

FIZICĂ

Clasele a XI-a și a XII-a

**ELECTRICITATE
ȘI
OPTICĂ**

XI-XII

Editura didactică și pedagogică
București, 1980

N. HANGA
N. STĂNESCU
A. NEGULESCU
M. ONCESCU

M. PETRESCU — PRAHOVA
I. PETRESCU — PRAHOVA
T. POPESCU

FIZICĂ

Clasele a XI-a și a XII-a

ELECTRICITATE ȘI OPTICĂ



Editura didactică și pedagogică
București

Redactor: Elisabeta Mesaroş
Tehnoredactor: Viorica Condopol

Nr. colilor de tipar: 12
Bun de tipar: 28.04.1980



Com. nr. 276/26 593
Combinatul poligrafic
„CASA SCÂNTEII“
Bucureşti — R.S.R.

CUPRINS

ELECTRICITATE

1. Electrostatică	
A. Legea lui Coulomb	5
B. Câmp electrostatic	9
C. Potenţial electric	13
D. Condensatori	18
2. Electrocinetică	
A. Curentul electric de conducţie şi efectele lui	23
B. Legea lui Ohm	27
C. Curenţi ramificaţi	35
D. Măsurarea rezistenţelor electrice	44
E. Energia electrică	49
F. Legile electrolizei	52
3. Electromagnetism	
A. Câmpul magnetic constant şi acţiuni ale lui	56
B. Interacţiunea dintre câmpul magnetic şi substanţă	73
4. Inducţie electromagnetică	
A. Tensiunea electromotoare indusă şi legile ei	76
B. Autoinducţie	83
5. Curent alternativ	
A. Tensiuni electromotoare alternative	86
B. Circuite în curent alternativ	94
6. Maşini electrice rotative	
A. Maşini de curent alternativ	106
B. Maşini de curent continuu	116
7. Transformatoare	122
8. Procese electronice în gaze şi vid	
A. Fascicule de electroni	126
B. Fascicule de ioni	135
C. Plasmă	136
9. Semiconductori	
A. Curentul electric în semiconductori	142
B. Dioda semiconductoare	146
C. Tranzistorul	149
10. Unde electromagnetice	152

OPTICĂ

11. Optică geometrică	
A. Propagarea rectilinie a luminii.....	159
B. Reflexia luminii	161
C. Refracția luminii	162
D. Prisma optică	166
E. Lentile	169
12. Optică ondulatorie	
A. Interferența luminii	178
B. Difracția luminii	183
C. Concluzii cu privire la natura luminii.....	185
13. Optică fotonică	
A. Efectul fotoelectric	187
B. Celula fotoelectrică	191

ELECTRICITATE

1. ELECTROSTATICĂ

A. LEGEA LUI COULOMB

1.1. Legea atracției și respingerii electrostatice. În anul 1687, Newton a descoperit legea atracției universale, care stabilește că două corpuri punctiforme se atrag direct proporțional cu masele lor și invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele, lege care se exprimă matematic prin formula:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Între corpurile electrizate există forțe de interacțiune, adică forțe de atracție și forțe de respingere, electrostatice. Aceste fapte l-au determinat pe fizicianul francez Charles Coulomb (1736—1806) să extindă legea atracției universale și asupra forțelor de interacțiune electrostatică.

- Modulul forței de interacțiune (de atracție sau de respingere) dintre două corpuri electrizate, de dimensiuni foarte mici în raport cu distanța dintre ele, este direct proporțional cu produsul sarcinilor electrice și invers proporțional cu pătratul depărtării dintre centrele corpurilor electrizate.

Această lege a fost verificată experimental și s-a dovedit a fi exactă atât în cazul corpurilor de dimensiuni obișnuite cit și în microcosmosul atomic.

Se constată însă că modulul forței de interacțiune electrostatică depinde și de proprietățile mediului în care se găsesc corpurile electrizate. De aceea relația matematică care exprimă legea lui Coulomb în SI se scrie:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} \quad (1)$$

În care q_1 și q_2 sînt sarcinile electrice cu care sînt încărcate corpurile electrizate, iar r este depărtarea dintre centrele lor. Constanta ϵ (epsilon) se numește *permisivitatea absolută a mediului*. Ea caracterizează proprietățile electrice ale mediului. Se observă că într-un mediu oarecare, forța care se exercită între două sarcini electrice este cu atât mai mică cu cît ϵ este mai mare.

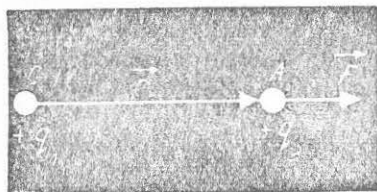


Fig. 1.1.

Legea lui Coulomb poate fi scrisă și vectorial. Pentru aceasta considerăm originea sistemului de referință în centrul sarcinii $+q_1$. Poziția sarcinii $+q_2$ este determinată de vectorul de poziție $\vec{r}$, iar forța de respingere va fi reprezentată prin vectorul $\vec{F}$, coliniar și de același sens cu vectorul $\vec{r}$ (fig. 1.1). În acest caz, vectorul $\vec{F}$ poate fi exprimat sub forma unui produs dintre un scalar a și vectorul $\vec{r}$, adică:

$$\vec{F} = a\vec{r}.$$

Pentru a determina valoarea lui a scriem ecuația sub formă scalară:

$$F = ar, \text{ de unde: } a = \frac{F}{r},$$

$$\text{în care } F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \text{ așa că: } a = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3},$$

ceea ce ne permite să scriem:

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r},$$

care este expresia vectorială a legii lui Coulomb. În cazul respingerii electrostatice, vectorii $\vec{F}$ și $\vec{r}$ sînt îndreptați în același sens, iar dacă sarcinile sînt de semn contrar, atunci $\vec{F}$ și $\vec{r}$ au sensuri contrare.

Se înțelege că, potrivit legii acțiunii și reacțiunii, forța pe care o exercită sarcina q_1 asupra sarcinii q_2 este egală și de sens opus forței cu care q_2 acționează asupra sarcinii q_1 .

1.2. Permitivitatea electrică. După cum am văzut, intensitatea forței de interacțiune dintre corpurile electrizate depinde și de proprietățile electrice ale mediului, caracterizat prin permitivitatea sa electrică. În vid forța de interacțiune electrică este maximă, ceea ce înseamnă că permitivitatea electrică absolută a vidului este minimă.

În Sistemul Internațional de unități, permitivitatea absolută a vidului are valoarea:

$$\epsilon_0 = 8,856 \cdot 10^{-12} \text{ farad/metru } \left(\frac{F}{m}\right).$$

Permitivitatea absolută este o mărime a cărei valoare depinde de sistemul de unități în care o exprimăm.

În tabele, găsim, de obicei, permitivitatea relativă.

Se numește permitivitate relativă raportul dintre permitivitatea absolută a mediului și permitivitatea absolută a vidului. Adică:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}.$$

Permitivitatea relativă este deci un număr (fără dimensiuni) avînd aceeași valoare în orice sistem de unități. Ea ne arată de cîte ori forța de interacțiune în vid este mai mare decît forța de interacțiune într-un anumit mediu. În adevăr, dacă scriem legea lui Coulomb pentru vid și pentru un mediu oarecare:

$$F_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ și } F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2},$$

rezultă că:

$$\frac{F_0}{F} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r.$$

Din cele arătate pînă acum înseamnă că permitivitatea relativă a vidului este egală cu unitatea, iar a celorlalte medii este mai mare decît 1.

Dăm mai jos valoarea permitivității relative a cîtorva medii:

Solide		Lichide		Gaze	
Parafină	2	Petrol	2	Heliu	1,00007
Ebonită	2,7	Ulei de transformator	2,5	Hidrogen	1,0003
Sulf	3,6—4,3	Anilină	7,2	Aer	1,0006
Sticlă	5—7	Alcool etilic	26	Bioxid de carbon	1,001
Porțelan	6	Apă	81		
Mică	6				

Observăm că permitivitatea relativă a gazelor diferă foarte puțin de unitate, ceea ce înseamnă că, practic, forțele coulombiene în aer uscat sînt sensibil egale cu acelea care se exercită în vid.

Observație. Dacă ținem seama că $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ rezultă că:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r,$$

iar formula lui Coulomb poate fi scrisă și sub forma:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2},$$

în care $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ este o constantă a cărei valoare în SI este:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,856 \cdot 10^{-12}} \approx 9 \cdot 10^9.$$

Vom putea scrie:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q_2}{\epsilon_r r^2}$$

în care F se exprimă în newtoni (unitatea SI de forță), q_1 și q_2 în coulombi, iar r în metri.

1.3. Unitatea de sarcină electrică. În Sistemul Internațional cantitatea de electricitate este o mărime derivată. Unitatea de cantitate de electricitate se numește *coulomb* (C). Un coulomb este egal cu un amper $\times$ secundă. Adică:

$$1C = 1A \times 1s.$$

Un coulomb corespunde unui anumit număr de sarcini electrice elementare. Măsurători exacte au stabilit că sarcina electrică a unui electron este:

$$e = -1,602 \cdot 10^{-19} C \approx -1,6 \cdot 10^{-19} C,$$

ceea ce înseamnă că o cantitate de electricitate negativă de un coulomb cuprinde:

$$\frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 625 \cdot 10^{16} \text{ electroni.}$$

În fenomenele în care intervin cantități mici de electricitate se folosesc, de obicei, multiplii coulombului, care, ca și multiplii altor unități, sînt formați cu ajutorul prefixelor incluse în tabelul următor:

Prefix		Factorul multiplicator al unității	Simbol
tera	10^{12}	1 000 000 000 000	T
giga	10^9	1 000 000 000	G
mega	10^6	1 000 000	M
kilo	10^3	1 000	k
hecto	10^2	100	h
deca	10^1	10	da
deci	10^{-1}	0,1	d
centi	10^{-2}	0,01	c
mili	10^{-3}	0,001	m
micro	10^{-6}	0,000 001	μ
nano	10^{-9}	0,000 000 001	n
pico	10^{-12}	0,000 000 000 001	p
femto	10^{-15}	0,000 000 000 000 001	f
atto	10^{-18}	0,000 000 000 000 000 001	a

PROBLEME

1. Cu ce forță se atrag două sarcini electrice de $-5\mu C$ și $+4\mu C$, cînd se găsesc în petrol la 30 cm depărtare una de alta?

Răspuns: $F = -1 N$

2. Cu ce cantitate de electricitate trebuie încărcate două conductoare punctiforme pentru a se respinge cu o forță de 1 N, cînd se găsesc în vid la 1 m depărtare una de alta?

Răspuns: $q = 1,05 \cdot 10^{-3} C$

3. Două sarcini electrice egale cu câte $10\mu C$ fiecare se găsesc în vid la 10 cm depărtare una de alta. Cu ce forță se resping?

Răspuns: $F = 90 N$.

4. Două sarcini punctiforme încărcate cu aceeași cantitate de electricitate se resping în vid la 5 cm depărtare. La ce depărtare ar trebui să fie așezate în ulei de transformator pentru a se respinge cu aceeași forță? Să se generalizeze problema.

Răspuns: $x = 3,16 \text{ cm}$; $x = \frac{r}{\sqrt{\epsilon_r}}$.

5. Două bobite de soc avînd fiecare masa de 0,4 g, suspendate de cîte un fir de mătase de 10 cm lungime și încărcate deodată cu aceeași cantitate de electricitate, se resping la o distanță de 12 cm. Cu ce cantitate de electricitate au fost încărcate bobitele de soc?

Răspuns: $q_1 = q_2 = 68,6 \cdot 10^{-9} C$.

6. Cu ce forță se resping doi electroni care se găsesc la 10^{-10} cm depărtare unul de altul?

Răspuns: $F = 23,04 \cdot 10^{-9} N$.

B. CÎMP ELECTROSTATIC

1.4. Intensitatea cîmpului electrostatic. Un corp electrizat își manifestă prezența prin forțele de atracție sau de respingere cu care acționează asupra altor corpuri electrizate aflate în apropierea lui. Faptul acesta este datorat cîmpului electrostatic, numit și cîmp coulombian, care ia naștere în jurul oricărei sarcini electrice.

Așadar: orice sarcină electrică creează în jurul ei un cîmp electrostatic prin care se transmit acțiunile electrostatice. *Cîmpul electrostatic este un aspect al materiei.*

Să considerăm o sarcină punctiformă $+Q$ care creează în jurul ei un cîmp electrostatic. Din această cauză, sarcina electrică $+q$ aflată în cîmp la distanța r de sarcina Q va fi respinsă cu o forță F conform legii lui Coulomb:

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r^2}.$$

- Se numește intensitate a cîmpului electrostatic într-un punct și se notează cu E raportul dintre intensitatea forței F și sarcina q aflată în acel punct din cîmp. Adică:

$$E = \frac{F}{q}. \quad (1)$$

Aceasta înseamnă că intensitatea cîmpului electrostatic este mărimea fizică numeric egală cu forța electrostatică care acționează asupra unității de sarcină aflată în punctul considerat din cîmpul electrostatic. În adevăr, dacă $q = 1$, atunci $E = F$.

Dacă în formula de definiție a intensității cîmpului electrostatic înlocuim forța cu valoarea ei dată de legea lui Coulomb, obținem:

$$E = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2 q}$$

de unde:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2)$$

ceea ce înseamnă că intensitatea cîmpului electrostatic într-un punct oarecare este direct proporțională cu sarcina electrică punctuală care îl creează și variază invers proporțional cu pătratul depărtării de această sarcină.

În același timp se constată că într-un mediu oarecare, intensitatea cîmpului electrostatic este mai mică decît în vid, și anume, cu atît mai mică cu cît permitivitatea mediului este mai mare.

Ținînd seama că $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ și înlocuind constanta $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ prin valoarea ei, formula în SI a intensității cîmpului electrostatic va putea fi scrisă sub forma simplificată:

$$E = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\epsilon_r r^2} \quad (2')$$

În SI, intensitatea cîmpului electrostatic se măsoară în volt pe metru (V/m)*.

Ecuația (1) ne permite să calculăm direct forța care acționează asupra unei sarcini electrice q aflate într-un cîmp electrostatic de intensitate cunoscută E . În adevăr, putem scrie că:

$$F = qE, \quad (3)$$

în care F se măsoară în newtoni, q în coulombi, iar E în volți pe metru.

Intensitatea cîmpului electrostatic este o mărime vectorială, de aceea se reprezintă printr-un vector $\vec{E}$ îndreptat în sensul în care s-ar deplasa sarcina electrică pozitivă aflată în cîmp, în acel punct (fig. 1.2).

Observație. Ținînd seama de caracterul vectorial al mărimilor care intervin, (3) se poate scrie:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (3')$$



Fig. 1.2

* Justificarea este dată la § 1.9.



Fig. 1.3

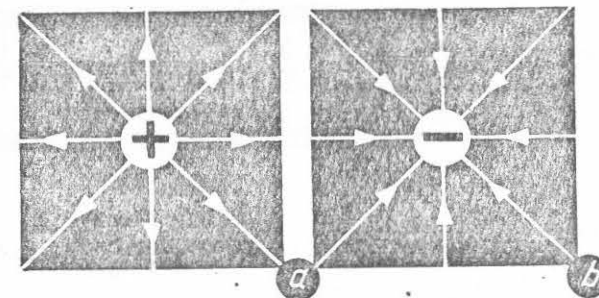


Fig. 1.4

Această formulă este asemănătoare cu formula fundamentală a mecanicii, aplicată la cîmpul gravitațional:

$$\vec{G} = m\vec{g},$$

în care $\vec{G}$ este forța care acționează în cîmpul gravitațional asupra unui corp de masă m , iar accelerația gravitației $\vec{g}$ corespunde intensității cîmpului gravitațional.

1.5. Liniile de cîmp în cîmpul electrostatic. Cîmpul electrostatic se caracterizează prin existența liniilor de cîmp. Se numește linie de cîmp curba tangentă în orice punct vectorului $\vec{E}$, intensitate a cîmpului electric (fig. 1.3).

Se ia ca sens al liniilor de cîmp sensul vectorului $\vec{E}$. De aceea, liniile de cîmp pleacă radial dintr-un corp încărcat pozitiv (fig. 1.4, a) și converg radial spre un corp încărcat negativ (fig. 1.4, b). Deci, o sarcină electrică punctuală pozitivă poate fi considerată ca punctul de unde încep liniile de cîmp electric, iar sarcina punctuală negativă, locul unde sfîrșesc liniile de cîmp electric.

Pe un conductor electrizat de formă oarecare, liniile de cîmp sînt perpendiculare pe suprafața conductorului, iar în cîmpul electrostatic, ele nu se întretaie. De aceea, în cîmpurile electrostatice create de sarcini electrice diferite, liniile de cîmp sînt linii curbe, care se îndreaptă de la corpurile încărcate pozitiv spre cele încărcate negativ (fig. 1.5, a). Liniile de cîmp produse de două sarcini încărcate cu același fel de electricitate se observă în figura 1.5, b.

Un cîmp electrostatic uniform se caracterizează prin linii de cîmp paralele și echidistante. Un asemenea cîmp electrostatic uniform se formează între

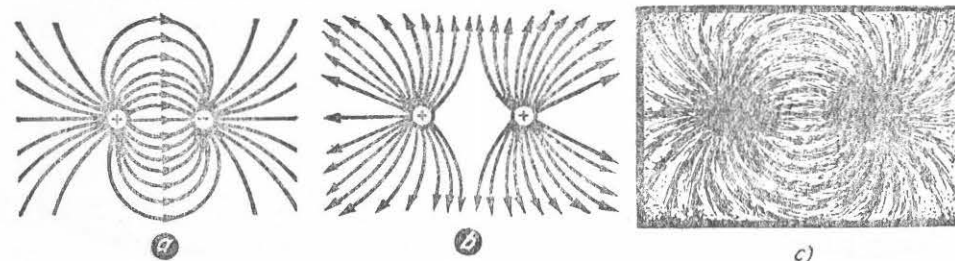


Fig. 1.5

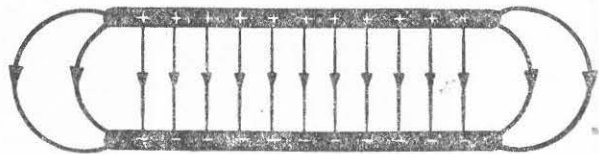


Fig. 1.6

două plăci paralele, apropiate, încărcate cu cantități de electricitate egale, dar de semn contrar (fig. 1.6).

Liniile de câmp ale câmpului electrostatic se pot face vizibile în felul următor: pe o placă de sticlă se lipesc două rondele de staniol. Se încarcă rondelele cu electricitate de semn contrar, punindu-le în legătură cu cei doi poli ai unei mașini electrostatice. Se presară apoi pe sticlă firișoare scurte de păr, bine uscate (tăiate dintr-o perie) sau mici cristale aciforme de ghips. Firișoarele se orientează după direcția liniilor de câmp (fig. 1.5, c), formînd un spectru al liniilor de câmp ale câmpului electrostatic.

În interiorul unui conductor nu există sarcini electrice. Ele se repartizează numai pe suprafața acestuia. Acest fapt se poate observa cu ajutorul dispozitivului din figura 1.7.

De aceea, în interiorul conductoarelor electrizate nu există linii de câmp; în aceste regiuni câmpul electrostatic este nul.

Acest fenomen este folosit pentru ecranarea electrică a unor dispozitive, adică pentru protejarea lor de acțiunea câmpului electric exterior. Ecranarea

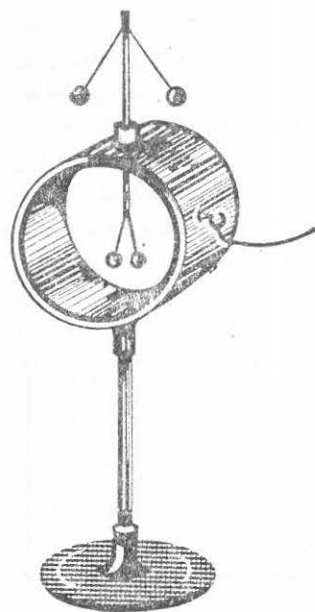


Fig. 1.7

conductoarelor electrizate poate fi demonstrată experimental, dacă acoperim un electroscope încărcat cu o cușcă de sîrmă, numită cușcă lui Faraday (fig. 1.8). Apropiînd de cușcă de sîrmă un baston de sticlă electrizat, observăm că foia electroscoapului nu-și schimbă deviația.

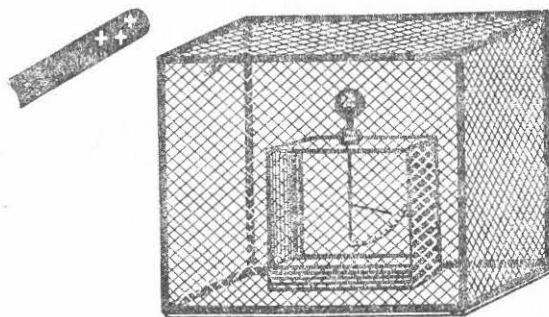


Fig. 1.8

Presiunea electrostatică. Proprietatea vîrfurilor ascuțite. Sarcinile electrice de pe conductoarele electrizate sînt respinse de către sarcinile vecine; de aceea pe suprafața conductoarelor electrizate se creează o presiune electrostatică.

Presiunea electrostatică este mult mai mare la vîrfuri, unde cantitatea de electricitate este mai mare. Din această cauză, electricitatea se scurge prin vîrfuri. De aceea piesele conductoare ale corpurilor supuse electrizării nu trebuie să aibă vîrfuri ascuțite, ci să fie întotdeauna terminate prin sfere conductoare, pentru a împiedica scurgerea electricității.

INTREBĂRI

1. Cum s-ar putea calcula forța ce acționează asupra unei sarcini electrice aflate în câmpul electric creat de mai multe sarcini? Reprezentare geometrică.
2. Ce se înțelege prin intensitatea câmpului electrostatic?
3. Se poate calcula în mod asemănător (pct. 1), câmpul electric rezultat?
4. Cum se pot face vizibile liniile de forță ale câmpului electrostatic?

C. POTENȚIAL ELECTRIC

1.6. Lucrul mecanic al forțelor electrice. Am văzut că în jurul unui corp electrizat se găsește un câmp electrostatic în care sarcinile electrice se deplasează. Pentru deplasarea unei sarcini electrice, câmpul electrostatic efectuează un lucru mecanic.

Să considerăm o sarcină electrică $+Q$ (fig. 1.9), care creează în jurul ei un câmp electric. O sarcină electrică punctiformă $+q$ se deplasează în acest câmp sub acțiunea forțelor electrice de respingere. Să presupunem că sub acțiunea acestor forțe, sarcina electrică $+q$ s-a deplasat din A în B . În acest timp, forța electrică ce acționează asupra sarcinii $+q$ produce un lucru mecanic L . Dar în timpul acestei deplasări, forța electrică nu rămîne constantă, deoarece scade cu pătratul depărtării de sarcina electrică $+Q$.

În A intensitatea forței este $F_A = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_A^2}$, iar în B , $F_B = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_B^2}$. Considerăm deplasarea din A în B ca o sumă de deplasări mici $AC, CD, \dots, IJ, \dots, NB$ egale între ele. Lucrul mecanic efectuat din A în B se calculează prin însumarea lucrului mecanic efectuat pe fiecare porțiune în parte.

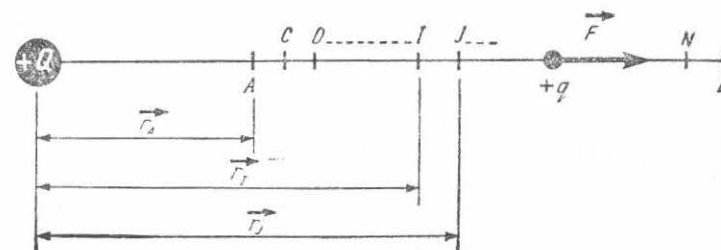


Fig. 1.9

Notăm cu ΔL lucrul mecanic efectuat pentru transportul sarcinii pe un segment, de exemplu, din I în J . Modulele forțelor electrice la capete sînt respectiv: $F_I = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_I^2}$ și $F_J = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_J^2}$ și pentru că distanța este foarte mică putem considera că $F_I = F_J$ și să scriem că $r_I^2 = r_I \cdot r_J$:

$$F_I = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_I^2} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_I r_J} = F_J.$$

Se obține:

$$\Delta L = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r_I r_J} (r_J - r_I) = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J} \right).$$

Lucrul mecanic total pe drumul AB este:

$$L = \sum_A^B \Delta L = \sum_A^B \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J} \right) = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \sum_A^B \left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J} \right),$$

adică:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_G} \right) + \left(\frac{1}{r_G} - \frac{1}{r_D} \right) + \dots + \left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J} \right) + \dots + \left(\frac{1}{r_N} - \frac{1}{r_B} \right) \right].$$

Se observă că termenii se reduc doi câte doi afară de primul și ultimul.

Deci:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right). \quad (1)$$

în care r_A și r_B sînt distanțele punctelor A și B față de centrul sarcinii Q .

1.7. Potențial electric. Diferența de potențial. Cîmpul electrostatic are energie potențială, deoarece forțele electrice produc un lucru mecanic cînd deplasează o sarcină electrică liberă aflată în cîmp.

- Se numește potențial electric într-un punct al cîmpului raportul dintre lucrul mecanic cheltuit pentru a deplasa o sarcină electrică din acest punct la infinit și acea sarcină electrică:

$$V = \frac{L}{q}, \quad (2)$$

dacă $q = 1$, $V = L$ ceea ce înseamnă că: potențialul electric V este o mărime numerică egală cu lucrul mecanic cheltuit pentru a deplasa unitatea de sarcină electrică dintr-un punct al cîmpului la infinit.

În acest caz, lucrul mecanic L va fi:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{r_A},$$

deoarece $\frac{1}{r_B} \rightarrow 0$, cînd $r_B \rightarrow \infty$. Așadar

$$V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon r_A} \quad (3)$$

Potențialul electric într-un punct al cîmpului este deci direct proporțional cu sarcina electrică care îl creează și descrește cu depărtarea.

În punctul B al cîmpului, potențialul electric va fi:

$$V_B = \frac{Q}{4\pi\epsilon r_B}.$$

Expresia lucrului mecanic în cîmpul electrostatic:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

poate fi scrisă și sub forma:

$$L = q \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon r_A} - \frac{Q}{4\pi\epsilon r_B} \right),$$

adică

$$L = q(V_A - V_B), \quad (4)$$

în care $V_A - V_B$ reprezintă diferența de potențial dintre punctele A și B ale cîmpului electrostatic. Deci:

- Lucrul mecanic efectuat pentru a deplasa o sarcină electrică q între două puncte ale cîmpului electric este direct proporțional cu diferența de potențial ce există între aceste două puncte și nu depinde de drumul urmat de sarcina electrică.

Diferența de potențial $V_A - V_B$ între două puncte ale cîmpului electrostatic se numește *tensiune electrică* și se notează cu U .

Toate punctele dintr-un cîmp electric care au același potențial formează o suprafață echipotențială*. Pe o suprafață echipotențială, sarcinile electrice se deplasează fără să se efectueze lucru mecanic.

Potențialul electric este o mărime scalară ca și lucrul mecanic. El poate fi însă pozitiv sau negativ. O sarcină electrică pozitivă creează un potențial electric pozitiv, iar o sarcină electrică negativă creează un potențial electric negativ.

Din expresia generală:

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}$$

rezultă că potențialul electric creat de o sarcină electrică are valoarea maximă (în valoare absolută) în punctele în care se află sarcina electrică și scade cu cit ne depărtăm de acestea, tinzînd spre zero, cînd depărtarea tinde spre infi-

* Suprafața unui conductor pe care sarcinile electrice sînt în echilibru este echipotențială, deoarece, în caz contrar, existînd o diferență de potențial, ar exista o deplasare de sarcini.

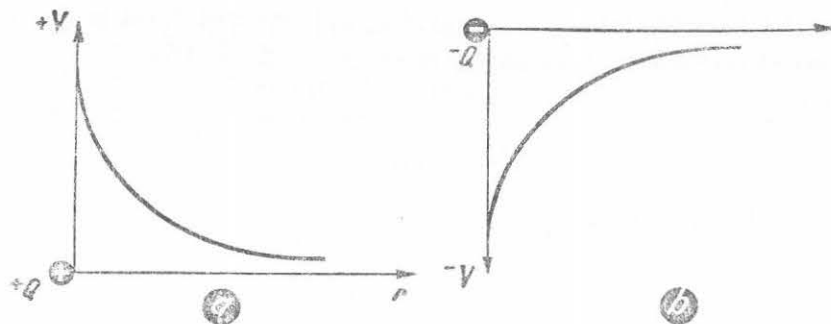


Fig. 1.10

nit. Adică, potențialul electric creat de o sarcină electrică scade cu depărtarea (fig. 1.10). Practic, potențialul electric din jurul unui corp electrizat devine zero cu mult înainte de a ne depărta prea mult de corp (deci cu mult înainte ca depărtarea să devină infinit de mare).

Observăm că o sarcină electrică pozitivă care se găsește într-un câmp electrostatic creat de o sarcină tot pozitivă se va deplasa de la un potențial mare spre un potențial mic, în timp ce o sarcină electrică negativă se deplasează de la un potențial mic (negativ) spre un potențial mai mare.

Faptul că toate corpurile electrizate se descarcă atunci când sunt puse în legătură cu pământul permite să se considere în mod convențional că potențialul pământului este nul. Așadar diferența de potențial dintre un corp electrizat și pământ este numeric egală cu potențialul corpului electrizat.

1.8. Unitatea de potențial. Din relația de definiție:

$$V_A - V_B = \frac{L}{q}$$

putem defini unitatea de tensiune electrică, adică unitatea de diferență de potențial. În adevăr, notînd cu $\langle U \rangle$ unitatea de tensiune electrică, cu $\langle L \rangle$ unitatea de lucru mecanic și cu $\langle q \rangle$ unitatea de cantitate de electricitate, putem scrie că:

$$\langle U \rangle = \frac{\langle L \rangle}{\langle q \rangle}.$$

În Sistemul Internațional de unități, potențialul și tensiunea electrică se măsoară în volți (V). Evident că:

$$1V = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}}.$$

ceea ce înseamnă că: *Între două puncte ale câmpului electrostatic există o tensiune de un volt, dacă se efectuează un lucru mecanic de un joule, când se transportă o sarcină de un coulomb între aceste puncte. De asemenea: Potențialul într-un punct al câmpului este de un volt dacă se efectuează un lucru mecanic de un joule pentru a transporta o sarcină de un coulomb din acel punct la infinit.*

1.9. Legătura dintre câmp și potențial. Am arătat că în jurul unei sarcini punctiforme Q ia naștere un câmp electrostatic care variază invers proporțional cu pătratul depărtării de sarcină: $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$. Potențialul electric în jurul aceleiași sarcini Q variază invers proporțional cu depărtarea: $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}$. Comparînd cele două relații se ajunge la concluzia că la distanța r de sarcină $E = \frac{V}{r}$. Luînd $V = 1V$ și $r = 1 \text{ m}$, obținem unitatea de intensitate a câmpului în SI. De aceea intensitatea câmpului se măsoară în volt pe metru (V/m).

Plecînd de la formula de definiție a câmpului electrostatic $E = \frac{F}{q}$, rezultă că:

$$1 \frac{V}{m} = \frac{1N}{1C},$$

adică *un volt pe metru reprezintă intensitatea unui câmp electrostatic în care asupra unei sarcini de un coulomb acționează o forță de un newton.*

INTREBĂRI, EXERCIIII, PROBLEME

1. Cum se definește potențialul într-un punct al câmpului electrostatic? Dar diferența de potențial?
2. Ce fel de mărime fizică este potențialul electric și cum variază cu depărtarea de sarcina electrică?
3. Ce legătură există între câmp și potențial?
4. Care este intensitatea câmpului electric creat de o sarcină electrică punctiformă de $+10^{-6}C$ la 1 m depărtare:
 - a) cînd sarcina electrică se găsește în aer;
 - b) cînd sarcina electrică se găsește în ulei de transformator?

Răspuns: $9 \cdot 10^4 \text{ V/m}$; $3,6 \cdot 10^4 \text{ V/m}$.

5. Două sarcini electrice punctuale de $+0,2 \cdot 10^{-6}C$ și $+0,4 \cdot 10^{-6}C$ se găsesc în aer la 12 cm una de alta. Care este intensitatea câmpului electric la jumătatea distanței dintre ele?

Răspuns: $5 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.

6. Cu ce forță este deplasat un electron într-un câmp electric cu intensitatea de $3\,000\,000 \text{ V/m}$?

Răspuns: $4,8 \cdot 10^{-13} \text{ N}$.

7. Ce lucru mecanic se cheltuiește într-un câmp electric creat de o sarcină electrică $Q = +10^{-6}C$ în aer pentru a deplasa sarcina electrică punctuală $q = +10^{-7}C$ de la 1 m la 2 m depărtare de sarcina Q ?

Ce diferență de potențial există între aceste două puncte ale câmpului electrostatic?

Răspuns: $L = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ J}$; $U = 4,5 \cdot 10^5 \text{ V}$.

8. O sarcină punctuală $+Q$ creează în jurul ei un câmp electrostatic care efectuează un lucru mecanic de $3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ pentru a deplasa o sarcină electrică $q = +10^{-8}C$ de la 1 m la 1,2 m depărtare de sarcina Q .

Să se calculeze valoarea sarcinii electrice Q și diferența de potențial între care s-a deplasat sarcina q .

Răspuns: $Q = +2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$; $U = 3 \cdot 10^4 \text{ V}$.

D. CONDENSATORI

1.10. Capacitatea electrică. Încărcând un conductor izolat și depărtat de orice alt conductor metalic cu o anumită cantitate de electricitate Q , potențialul lui se ridică la o anumită valoare V .

S-a stabilit experimental că pentru un anumit conductor, raportul $\frac{Q}{V}$ este constant.

Raportul constant dintre cantitatea de electricitate cu care este încărcat un conductor și valoarea la care se ridică potențialul său se numește capacitate electrică.

Notând cu C capacitatea electrică a conductorului, rezultă:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (1)$$

Unitatea SI de capacitate electrică se numește farad (F):

$$\langle C \rangle_{SI} = \frac{\langle Q \rangle_{SI}}{\langle V \rangle_{SI}} = \frac{1C}{1V} = 1F,$$

ceea ce înseamnă că un farad este capacitatea unui conductor izolat și depărtat de alte conductoare, care la potențialul de 1 V se încarcă cu un coulomb.

Faradul este o unitate de capacitate electrică foarte mare. De aceea, în practică se folosesc submultiplii faradului: microfaradul (μF), nanofaradul (nF) și picofaradul (pF)*.

Exemplu numeric. a) Să calculăm la ce potențial trebuie încărcată o sferă cu raza de 1 m pentru a primi în aer o cantitate de electricitate de $10^{-4}C$.

b) Care va fi potențialul sferei încărcate după ce va fi introdusă în petrol ($\epsilon_r = 2$)?

a) Utilizăm formula:

$$C = \frac{Q}{V}, \text{ în care } V = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}.$$

Deci:

$$C = \frac{Q}{\frac{Q}{4\pi\epsilon r}} = 4\pi\epsilon r$$

sau:

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \epsilon_r \cdot r.$$

* Pentru obținerea relațiilor de transformare se utilizează tabela de prefixe de la pagina 8.

Rezultă că:

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \epsilon_r \cdot r,$$

de unde:

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\epsilon_r \cdot r} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-4}}{1 \cdot 1} = 9 \cdot 10^5 \text{ volți.}$$

Deci, o sferă cu raza de 1 m va trebui să fie încărcată la un potențial de 900 000 volți pentru a concentra pe suprafața ei o cantitate de electricitate de o zecime de miime de coulomb.

b) Utilizând aceeași formulă:

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \epsilon_r \cdot r,$$

vom găsi că:

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\epsilon_r \cdot r};$$

de data aceasta $\epsilon_r = 2$, deci:

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-4}}{2 \cdot 1} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ volți.}$$

Așadar, prin cufundarea sferei în petrol, potențialul ei scade la jumătate.

1.11. Acumularea electricității pe conductoare. Se realizează dispozitivul din figura 1.11, format din două discuri metalice, montate pe picioare izolatoare.

Discul B poate culisa în lungul șinelor. Se leagă discul A cu un fir conductor de un electroscope îndepărtat. Se îndepărtează conductorul B și se încarcă A cu electricitate.

Înțeptele electroscoapului deviază proporțional cu potențialul la care se găsește conductorul A. Aproxim de discul A conductorul plan B. Observăm că pe măsura ce conductorul B se apropie de A, înțeptele electroscoapului își micșorează deviația, ceea ce înseamnă că potențialul lui scade. Întrucât cantitatea

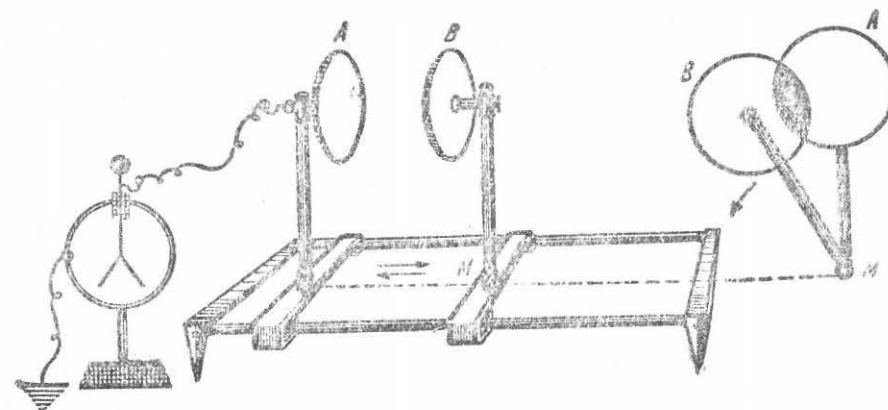


Fig. 1.11

de electricitate cu care este încărcat conductorul A a rămas aceeași, înseamnă că, prin apropierea conductorului B , capacitatea conductorului A a crescut. În adevăr, la început potențialul conductorului A a fost: $V = \frac{Q}{C}$. După ce s-a apropiat de el conductorul B , potențialul conductorului A a devenit: $V' = \frac{Q}{C'}$, și pentru că $V' < V$, rezultă $C' > C$. Capacitatea conductorului A a crescut.

Deviația foitelor electroscopei scade și mai mult pentru o aceeași poziție a conductoarelor din experiența precedentă, dacă între conductoare se introduce o placă de dielectric.

1.12. Condensatori electrici. Un ansamblu de două conductoare separate între ele printr-un strat izolator formează un *condensator electric*. Condensatorul are o capacitate mult mai mare decât capacitatea conductoarelor care îl formează.

Cele două conductoare care formează condensatorul se numesc armături și pot fi două suprafețe plane (*condensator plan*), două suprafețe sferice concentrice (*condensator sferic*) sau două suprafețe cilindrice coaxiale (*condensator cilindric*) separate între ele printr-un dielectric.

Un condensator se încarcă când una din armături este pusă la un potențial oarecare. În felul acesta, fiecare armătură se încarcă cu aceeași cantitate de electricitate, dar de semn contrar. Între armături există o diferență de potențial care dă naștere în dielectric unui câmp electric, în general, foarte intens.

Capacitatea electrică a unui condensator este definită prin raportul între sarcina unei armături Q și diferența de potențial dintre cele două armături A și B :

$$C = \frac{Q}{V_A - V_B} \quad (2)$$

Unind armăturile printr-un conductor, condensatorul se descarcă, producând o scintee electrică. Condensatorul este deci un acumulator de energie electrică. Lucrul mecanic efectuat pentru încărcarea lui mărește energia potențială, care apoi este eliberată brusc, la descărcare, sub formă de scintee electrice.

1.13. Gruparea condensatorilor. În practică se pune de multe ori problema să obținem o capacitate diferită de aceea a condensatorilor de care dispunem. Lucrul acesta se realizează prin gruparea condensatorilor. Grupind mai mulți condensatori împreună, ei se comportă ca un condensator unic, cu o capacitate diferită de aceea a fiecărui condensator în parte.

Mai mulți condensatori grupați împreună formează o baterie de condensatori. Condensatorii se pot grupa în paralel (în suprafață), în serie (în cascadă) și mixt.

a) *Gruparea condensatorilor în paralel* se realizează legind toate armăturile pozitive împreună și, de altă parte, toate armăturile negative împreună (fig. 1.12). În felul acesta, armăturile pozitive sînt puse la același potențial V_A , iar armăturile negative, la potențialul V_B (care poate fi zero, dacă armăturile sînt legate la pămînt).

Însemnăm cu C_1 , C_2 și C_3 capacitățile celor trei condensatori din figura 1.12 grupați în suprafață. Fiind puși la aceeași diferență de potențial $V_A - V_B$, vor acumula cantități de electricitate diferite Q_1 , Q_2 , Q_3 (deoarece au capacități diferite) în așa fel încît:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_A - V_B}, \quad C_2 = \frac{Q_2}{V_A - V_B} \text{ și } C_3 = \frac{Q_3}{V_A - V_B}$$

Gruparea va funcționa sub aceeași diferență de potențial. Deci, capacitatea bateriei este: $C = \frac{Q}{V_A - V_B}$, în care Q este cantitatea totală de electricitate acumulată de baterie, adică:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Înlocuind în această egalitate cantitățile de electricitate cu valorile lor scoase din formula capacității, obținem

$$C(V_A - V_B) = C_1(V_A - V_B) + C_2(V_A - V_B) + C_3(V_A - V_B),$$

de unde:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3)$$

Deci, grupînd condensatorii în suprafață, capacitatea bateriei este egală cu suma capacităților condensatorilor grupați.

b) *Gruparea condensatorilor în cascadă* se realizează legind armăturile ca în figura 1.13. În acest caz, pe fiecare armătură se acumulează aceeași cantitate de electricitate, alternativ pozitivă și negativă, iar potențialul armăturilor legate împreună este același.

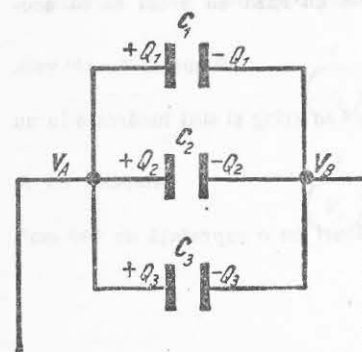


Fig. 1.12

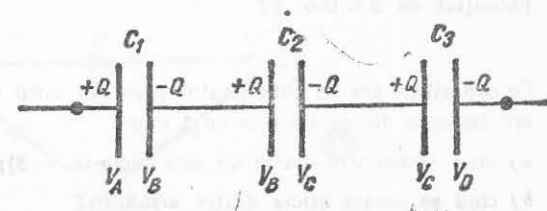


Fig. 1.13

Capacitățile condensatorilor fiind diferite putem scrie:

$$C_1 = \frac{Q}{V_A - V_B}; \quad C_2 = \frac{Q}{V_B - V_C}; \quad C_3 = \frac{Q}{V_A - V_D}.$$

Gruparea va conține aceeași cantitate de electricitate Q la potențialul $V_A - V_D$ egal cu suma diferențelor de potențial la care se găsește fiecare condensator în parte, adică:

$$C = \frac{Q}{V_A - V_D}.$$

Ținând seama că:

$$V_A - V_D = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D)$$

și înlocuind diferențele de potențial prin valorile lor scoase din formulele capacităților obținem:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3},$$

de unde:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (4)$$

Deci, în cazul grupării condensatorilor în cascadă, *inversul capacității bateriei este egal cu suma inverselor capacităților condensatorilor grupați*. Se obține astfel o capacitate mai mică decât capacitatea fiecărui condensator în parte.

ÎNTREBĂRI, EXERCITII, PROBLEME

1. La ce potențial trebuie încărcat un condensator sferic cu raza de 9 cm ca să acumuleze în aer o cantitate de electricitate de 10^{-6} C?

Răspuns: $V = 10^4$ volți.

2. Cu ce forță se resping două sfere egale în mărime când se ating și sînt încărcate la un potențial de 300 000 V?

Răspuns: 2,5 N.

3. Ce capacitate are un condensator plan ale cărui armături au o suprafață de 100 cm^2 , iar distanța dintre ele este de 2 mm:

- a) când dielectricul dintre ele este sticla ($\epsilon_r = 8$);
- b) când se scoate sticla dintre armături?

Răspuns: 354,24 pF; 44,28 pF.

2. ELECTROKINETICĂ

A. CURENTUL ELECTRIC DE CONDUCTIE ȘI EFECTELE LUI

2.1. Curentul electric de conducție. Conductoarele metalice conțin electroni liberi, care se mișcă dezordonat printre ionii rețelei cristaline ce formează metalul. Conductoarele lichide conțin numeroși ioni, purtători microscopici de sarcini, pozitivi sau negativi, aflați, de asemenea, în mișcare dezordonată prin lichid. Dacă aceste conductoare se găsesc într-un câmp electric, atunci asupra fiecărui purtător de sarcină electron sau ion câmpul electric exercită forțe care îi imprimă o mișcare. Ca urmare, peste mișcarea lor dezordonată se suprapune o mișcare ordonată, adică purtători de același fel de sarcină se mișcă în ansamblu pe aceeași direcție, în același sens. *Curentul electric de conducție constă în mișcarea ordonată față de conductor a purtătorilor microscopici de sarcină electrică, liberi în interiorul lui.*

În conductoarele metalice, purtătorii de sarcină fiind electroni liberi, curentul electric se numește *curent electronic*. În lichide purtătorii de sarcină fiind ioni pozitivi sau negativi, curentul electric se numește *curent ionic*.

2.2. Generator electric. Printr-un fir conductor se unesc două conductoare A și B (fig. 2.1, a), încărcate la potențiale diferite $V_B > V_A$. Electronii trec de pe conductorul A pe conductorul B, în sensul arătat de săgeată, pînă ce potențialele lor se egalează. Curentul electric a durat un timp foarte scurt. Pentru a menține un timp mai îndelungat curentul electric prin firul C, trebuie menținută constantă diferența de potențial $V_B - V_A$ dintre conductoarele A și B. Pentru aceasta trebuie ca electronii să revină continuu de la B la A printr-un alt fir conductor BGA (fig. 2.1, b). Electronii pot trece de la A la B sub acțiunea forțelor electrice produse de câmpul electrostatic dintre conductoarele încărcate A și B. Ei nu pot reveni însă prin firul BGA sub acțiunea aceluiași fel de forțe electrostatice. Acest fir trebuie să treacă printr-un dispozitiv G, capabil să transmită electronilor o anumită energie, pentru ca aceștia să poată învinge forțele produse de câmpul electrostatic. Acest dispozitiv G se numește *generator* sau *sursă electrică*. Sursa produce și menține

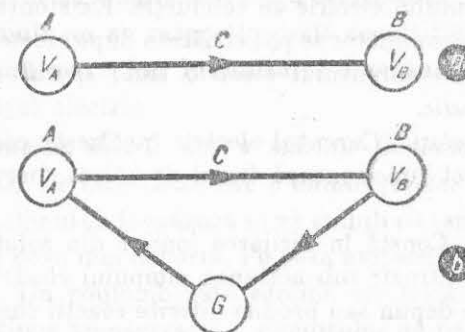


Fig. 2.1

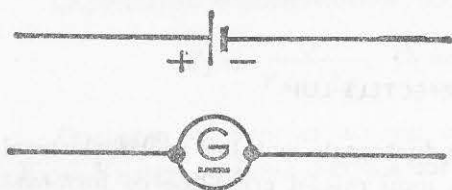


Fig. 2.2

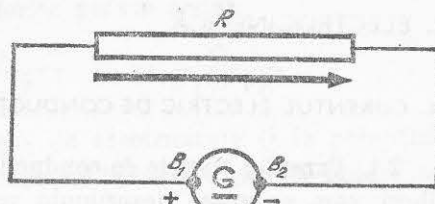


Fig. 2.3

tensiunea electrică necesară trecerii curentului. Tensiunea produsă se numește *tensiune electromotoare*.

Energia sursei — de origine mecanică, chimică, internă etc. — se transformă în energie electrică cedată circuitului.

În mod convențional, generatorul electric de tensiune continuă se reprezintă prin simbolurile din figura 2.2.

2.3. Circuit electric. Curentul electric continuu (constant ori variabil) se poate produce numai într-un circuit închis. Acesta se compune din două părți: generatorul G și receptoarele R (fig. 2.3) sau consumatoarele de energie electrică. Receptoare sînt sîrmele de legătură și aparatele care utilizează energie electrică. Porțiunea de circuit B_1GB_2 care se găsește în interiorul generatorului se numește *circuit interior*. Porțiunea de circuit formată din receptoare se numește *circuit exterior*. Tensiunea electromotoare produsă de generator se notează cu E .

Lucrul mecanic efectuat de forțele exercitate de cîmpul electromotor pentru a transporta sarcina electrică q este dat de relația:

$$L = Eq,$$

care se obține din $L = Uq$, înlocuind U cu tensiunea electromotoare E , stabilită la studiul cîmpului electrostatic. Acest lucru mecanic este egal cu energia transmisă de generator în circuit pentru a transporta sarcina q .

Din $L = Eq$ se scoate: $E = \frac{L}{q}$.

Așadar, *tensiunea electromotoare este o mărime numeric egală cu energia transmisă de generator pentru a trece prin circuit unitatea de sarcină electrică*.

2.4. Efectele curentului electric de conducție. Existența și mărimea curentului electric dintr-un conductor se pot constata după efectele pe care le produc. Principalele efecte ale curentului electric sînt: *efectul electrocaloric, efectul chimic, efectul magnetic*.

a. Efectul electrocaloric. Curentul electric încălzește conductorul prin care circulă. Pe acest efect funcționează fierul de călcat, becul electric, ciocanul electric de lipit etc.

b. Efectul chimic. Constă în dirijarea ionilor din soluțiile conductoare — electroliți — către electrozi; sub acțiunea cîmpului electric, la electrozi ionii se neutralizează și se depun sau produc diferite reacții chimice. Fenomenul se numește *electroliză*.

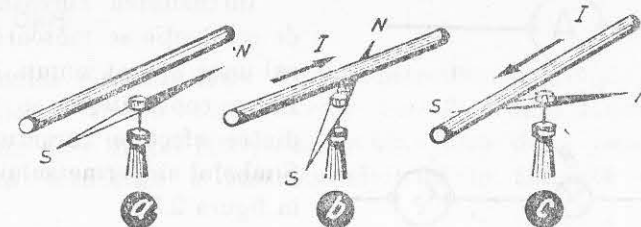


Fig. 2.4

c. Efectul magnetic. Curentul electric generează în jurul conductorului prin care trece un cîmp magnetic; acesta deviază din poziția $N-S$ un ac magnetic (fig. 2.4), aflat în vecinătatea curentului electric. Fenomenul a fost descoperit (1820) de Ørsted.

2.5. Sensul curentului electric. Experiențele au arătat că depunerea substanțelor la electrozi sau sensul de deviație al acului magnetic depind și de bornele generatorului la care se face conectarea firelor conductoare. Astfel, metalele se depun totdeauna la electrodul negativ, adică la capătul sîrmei legat la borna negativă a generatorului. De asemenea, polul N al acului magnetic își schimbă sensul deviației (fig. 2.4, b, c) dacă se inversează legăturile la bornele generatorului. Așadar: *curentul electric posedă o polaritate bine determinată. S-a ales ca sens al curentului electric sensul de mișcare a particulelor pozitive prin circuitul exterior. Prin circuitul exterior R (fig. 2.3), curentul circulă de la borna B_1 , considerată pozitivă, către borna B_2 , considerată negativă*.

Este de remarcat că alegerea acestui sens este convențională. Sensul curentului coincide cu sensul mișcării cationilor în cazul curentului ionic, dar este opus sensului de mișcare a electronilor în curentul electronic. Toate legile și regulile din electrocinetică și electromagnetism au la bază acest sens al curentului electric.

2.6. Intensitatea curentului electric. Sînt mai intenși — au intensitate mai mare — curenții care produc în același interval de timp o încălzire mai mare sau depun o cantitate de substanță mai mare la electrozi, sau curenții electrici care deviază mai mult un ac magnetic decît curenții electrici care produc aceste efecte în măsură mai mică. Intensitatea curentului este o mărime care caracterizează curentul electric.

Intensitatea curentului electric este o mărime fundamentală a Sistemului Internațional. Unitatea de intensitate este o unitate fundamentală și se numește amper (simbol A). Etalonul ei de măsură se va stabili pe temeiul unor fenomene pe care le vom studia ceva mai departe. Pe baza amperului s-a definit unitatea de sarcină electrică. Un coulomb este sarcina electrică transportată într-o secundă printr-o secțiune transversală a circuitului de un curent de $1A$:

$$1C = 1A \cdot 1s = 1A \cdot s.$$



Fig. 2.5

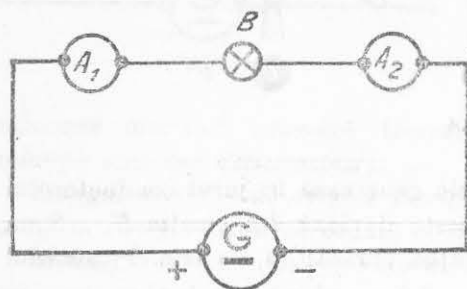


Fig. 2.6

Intensitatea curentului electric de conducție se măsoară cu ajutorul unui aparat numit *ampermetru*. El se construiește pe baza unuia dintre efectele curentului electric. Simbolul ampermetrului este arătat în figura 2.5.

Intensitatea rămâne constantă de-a lungul unui circuit neramificat. Considerăm un circuit în care un generator G alimentează cu curent continuu o lampă B (fig. 2.6.). Ampermetrele A_1 și A_2 indică aceeași intensitate a curentului electric. Cu alte cuvinte, amperme-

trul poate fi conectat în orice punct al circuitului neramificat: *intensitatea curentului electric este aceeași în tot lungul circuitului neramificat*.

Dacă se ține seama că un curent electric este o mișcare dirijată de purtători de sarcină electrică (în cazul conductoarelor metalice, electronii), este ușor de înțeles de ce intensitatea este aceeași în tot circuitul. Electronii pornesc de la borna negativă a generatorului, trec prin receptor și ajung la borna pozitivă a generatorului fără ca — în regim staționar — să se acumuleze în vreun punct al circuitului. Prin mișcarea lor se transmite circuitului energia primită de la câmpul electromotor, respectiv de la sursă; numărul lor rămâne același*. De aceea prin fiecare secțiune a circuitului trece în fiecare secundă același număr de purtători de sarcină, deci intensitatea este aceeași.

Există cazuri în care curentul, fără a-și schimba sensul, are intensitatea variabilă. În cele ce urmează, când nu se specifică, este vorba de curent continuu constant.

ÎNTREBĂRI, EXERCITII

1. Să se compare curentul electronic cu curentul ionic.
2. Să se explice rolul generatorului într-un circuit parcurs de curent electric.
3. Din ce cauză intensitatea curentului continuu rămâne constantă de-a lungul unui circuit neramificat?
4. Un fier de călcat funcționează cu o intensitate de 4,8 A. Câți electroni trec pe secundă printr-o secțiune a circuitului?
5. O sferă metalică încărcată negativ este legată la pământ printr-un fir metalic. Ea se descarcă în 0,1 s, trecând prin fir un curent electric mediu de 10 μ A. Ce sarcină electrică a avut sfera inițial și ce număr de electroni conținea?

Răspuns: $3 \cdot 10^{19}$.

Răspuns: 10^{-4} C; $6,2 \cdot 10^{19}$.

* Receptoarele electrice (reșou, bec, fier de călcat, mașină de spălat rufe etc.) nu „consumă curent electric”, cum se spune de obicei. Ele consumă energie electrică.

8. LEGEA LUI OHM

2.7. Tensiunea electrică între două puncte ale circuitului. Generatorul electric produce tensiunea electromotoare, care determină mișcarea purtătorilor de sarcini de-a lungul întregului circuit. Între două puncte ale unui circuit există totdeauna o tensiune electrică (o anumită diferență de potențial).

Tensiunea electrică dintre două puncte ale unui circuit electric se măsoară cu ajutorul unui aparat, numit *voltmetru*. Bornele lui se conectează la punctele A și C , între care trebuie măsurată tensiunea electrică (fig. 2.7.). Spunem că voltmetrul se conectează în paralel cu porțiunea de circuit între capetele căreia se măsoară tensiunea. Voltmetrul V măsoară tensiunea dintre punctele A și C , între care se găsește consumatorul B (de exemplu, o lampă electrică), iar ampermetrul A se conectează în serie. Tensiunea electrică se măsoară în volți, în SI.

2.8. Legea lui Ohm. În mișcarea lor ordonată prin conductor (curentul electric), electronii întâmpină o forță de rezistență F_r , pe care o presupunem proporțională cu viteza dirijată a electronilor v_e , adică $F_r = kv_e$, k fiind un factor de proporționalitate.

Dacă F_e este forța care antrenează electronul, se poate scrie $F_e = F_r$. Dar $F_e = eE$, E fiind intensitatea câmpului electric. Așadar:

$$eE = kv_e; \quad v_e = \frac{eE}{k}. \quad (1)$$

Considerăm o porțiune din conductor cu secțiunea S și lungimea egală cu v_e (fig. 2.8.). Toți electronii cuprinși în volumul $V = Sv_e$, aflați în mișcare dirijată, vor ieși într-o secundă prin fața S_2 . Notând cu n_0 numărul de electroni liberi din unitatea de volum, se obține:

$$I = n_0 e S v_e.$$

Ținând seama de relația (1), se obține:

$$I = n_0 e S \frac{eE}{k} = \frac{n_0 e^2}{k} SE.$$

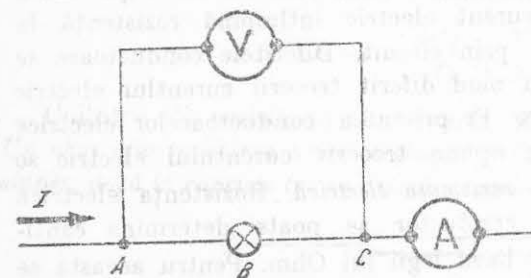


Fig. 2.7

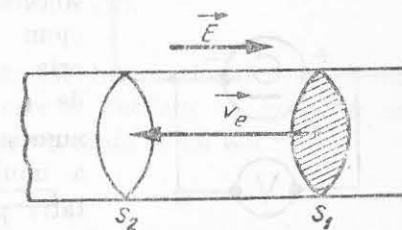


Fig. 2.8

Deoarece $E = \frac{U}{l}$, U fiind tensiunea aplicată la capetele conductorului de lungime l , se poate scrie:

$$I = \frac{n_0 e^2}{k} S \frac{U}{l}, \quad I = \frac{U}{\frac{k}{n_0 e^2} \cdot \frac{l}{S}}.$$

Ținând seamă că sarcina electronului e este constantă universală, iar n_0 și k sînt constante de material se poate nota $\rho = \frac{k}{n_0 e^2}$, o constantă de material pe care o numim rezistivitate. Atunci: $I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{U}{R}$, adică tocmai

legea lui Ohm în care $R = \rho \frac{l}{S}$. În această relație ρ fiind o constantă de material, iar S și l sînt dimensiuni ale conductorului, mărimea R caracterizează contribuția porțiunii de circuit la realizarea procesului numit curent electric. Ea se numește *rezistență electrică* a conductorului parcurs de curentul electric.

Expresia:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

se numește legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit, și se enunță astfel: *intensitatea curentului printr-o porțiune de circuit este egală cu cîtul dintre tensiunea aplicată la capetele acestei porțiuni de circuit și rezistența porțiunii de circuit*. Pentru ca această formă a legii lui Ohm să se poată aplica trebuie ca pe porțiunea de circuit să nu se găsească generatoare electrice.

2.9. Rezistența electrică. Rezistența electrică a unui conductor poate fi pusă în evidență experimental. În circuitul exterior al unei surse electrice (fig. 2.9) se conectează pe rînd o lampă B , un reșou, un fir metalic, un fier de călcat etc. De fiecare dată se măsoară tensiunea U și intensitatea I , cu voltmetrul V , respectiv cu ampermetrul A . Se constată că, deși tensiunea U

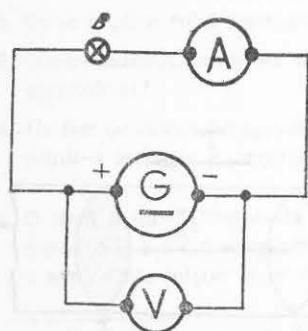


Fig. 2.9

rămîne practic aceeași, intensitatea curentului I variază de la caz la caz. Acest fapt arată că un curent electric întîmpină rezistență la trecerea prin circuit. Diferitele conductoare se opun în mod diferit trecerii curentului electric prin ele. Proprietatea conductoarelor electrice de a se opune trecerii curentului electric se numește *rezistență electrică*. Rezistența electrică a unui conductor se poate determina cantitativ pe baza legii lui Ohm. Pentru aceasta se repetă experiența din figura 2.9 în felul următor:

Aceluiași receptor B i se aplică tensiuni U de 2, de 3, de n ori mai mari, celelalte condiții rămînînd neschimbate. Se constată că intensitatea curentului I corespunzătoare devine de 2, de 3, de n ori mai mare. Urmează că pentru același receptor se poate scrie:

$$\frac{U}{I} = \frac{2U}{2I} = \frac{nU}{nI} = \text{const.} = K.$$

Repetind experiența cu alt receptor, raportul $\frac{U}{I} = \text{const.} = K_1$ rămîne tot constant, dar constanta K_1 are în general altă valoare decît în primul caz. *Valoarea acestei constante este o mărime caracteristică fiecărui conductor*. Această mărime măsoară cantitativ rezistența electrică a conductorului. Deci: *rezistența electrică a unui conductor este o mărime ce poate fi măsurată prin cîtul dintre tensiunea electrică constantă, aplicată între capetele conductorului și intensitatea curentului continuu produs de ea în conductor*.

Rezistorul este elementul de circuit care se caracterizează în principal prin rezistența lui electrică și este folosit pentru această proprietate. Rezistorul se reprezintă simbolic ca în figura 2.10. Existența rezistenței electrice se explică pe baza teoriei electronice ca urmare a ciocnirilor dintre electronii care formează curentul electric și ionii care formează rețeaua cristalină a metalului. Prin aceste ciocniri, electronii cedează ionilor energia lor cinetică. Sursa ce menține tensiunea la bornele circuitului, și, deci, cîmpul electric care pune electronii în mișcare dirijată transmite electronilor mereu altă energie, pe care prin ciocniri aceștia o transmit rețelei cristaline. Ca urmare, conductorul parcurs de curent electric se încălzește.

Cauza rezistenței electrice constă așadar în extrem de numeroasele ciocniri ale electronilor liberi cu ionii metalului. Rezistența electrică determină și proprietatea unui conductor de a transforma energia electrică în energie internă.

Din legea lui Ohm se deduce unitatea de rezistență electrică:

$$\langle R \rangle_{SI} = \frac{\langle U \rangle}{\langle I \rangle} = \frac{V}{A} = \text{ohm } (\Omega).$$

Unitatea de rezistență electrică în Sistemul Internațional este *ohmul*. Un ohm este rezistența unui conductor prin care se stabilește un curent de un amper, dacă la capetele lui se aplică o tensiune constantă de un volt.



Fig. 2.10



Georg Simon Ohm (1787–1854) fizician german. A studiat conductibilitatea metalelor și a descoperit (1826) legea fundamentală a curentului electric. A făcut cercetări în acustică (1843).

Inversul rezistenței electrice $G = \frac{1}{R}$ se numește *conductanță electrică*.

Unitatea de conductanță se numește *siemens*, cu simbolul S . Un siemens este conductanța unui circuit a cărui rezistență este de un ohm: $1S = 1\Omega^{-1}$.

2.10. Dependența rezistenței de dimensiunile și de natura conductorului. Analizând expresia rezistenței unui conductor $R = \frac{k}{n_0 e^2} \frac{l}{S}$ se constată că primul factor care se notează cu litera ρ este $\rho = \frac{k}{n_0 e^2}$ o mărime specifică structurii rețelei cristaline a conductorului. Ea a primit numele de *rezistivitate* și e un factor al rezistenței, care depinde de natura substanței conductorului. Al doilea factor este cîtlul dintre lungimea conductorului și secțiunea S a lui. Prin urmare rezistența unui conductor poate fi exprimată prin formula:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

în care l este lungimea conductorului, S este secțiunea lui, iar ρ este o constantă de material, numită *rezistivitate*. Cu ajutorul acestei formule se poate calcula rezistența unui conductor.

Dependența rezistenței de elementele geometrice ale conductorului și de natura acestuia se poate demonstra experimental.

Valoarea numerică a factorului ρ depinde și de unitățile în care se măsoară. Făcînd $l = 1 \text{ m}$ și $S = 1 \text{ m}^2$, din formula (3) se deduce că $\rho = R$, adică *rezistivitatea unei substanțe este o mărime numerică egală cu rezistența unui conductor din acea substanță, avînd lungimea de 1 m și secțiunea de 1 m²*. Unitatea de rezistivitate va fi:

$$\langle \rho \rangle_{SI} = \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m},$$

adică *ohm-metru*. Este rezistivitatea unei substanțe din care e făcut un conductor care avînd lungimea de 1 m și secțiunea de 1 m², este de rezistență de 1 Ω^* .

Inversul rezistivității $\sigma = \frac{1}{\rho}$ se numește *conductivitate* și se măsoară în $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

După valorile conductivității, substanțele se pot clasifica în: conductoare, dacă σ este cuprinsă între $10^5 - 10^8 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; semiconductoare, dacă σ este cuprinsă între $10^{-7} - 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; izolatoare, dacă σ este cuprinsă între $10^{-20} - 10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

* În electrotehnică se mai folosește pentru rezistivitate o unitate convențională care se numește ohm-milimetru pătrat pe metru:

$$\langle \rho \rangle_{\text{tehn.}} = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = \frac{\Omega \cdot 10^{-6} \text{m}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} = 1 \mu \Omega \cdot \text{m}.$$

2.11. Dependența rezistenței de temperatură. Rezistivitatea substanțelor depinde și de temperatură. O spirală din sîrmă subțire din fier R , în serie cu un ampermetru A (fig. 2.11) sînt conectate la o sursă electrică G . Încălzind spirala R cu o flacără, intensitatea indicată de ampermetrul A scade, ceea ce dovedește că rezistența firului din fier crește prin încălzire. Fenomenul a fost verificat la numeroase conductoare. Ținînd seamă de formula (3, § 2.10) și deoarece se constată că variația dimensiunilor l și S este neglijabilă, variația rezistenței provine din cauza variației rezistivității ρ . Așadar, rezistivitatea substanțelor conductoare variază cu temperatura. Pentru variații de temperatură nu prea mari, rezistivitatea variază în funcție de temperatură, după relația următoare:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (4)$$

în care ρ_0 este rezistivitatea la 0°C (273°K), ρ este rezistivitatea la temperatura t , iar α este coeficientul termic al rezistivității. Pentru metale pure, valoarea lui α este în jurul lui $0,004 \text{ grd}^{-1}$. La aliaje, valoarea coeficientului termic α este mai mică decît a metalelor componente. Pentru unele aliaje, valoarea lui poate fi considerată practic nulă. Astfel de aliaje sînt: *manganina* ($86\% \text{ Cu} + 12\% \text{ Mn} + 2\% \text{ Ni}$), *constantanul* ($54\% \text{ Cu} + 45\% \text{ Ni} + 1\% \text{ Mn}$), *nichelina* ($62\% \text{ Cu} + 18\% \text{ Ni} + 20\% \text{ Zn}$), *crom-nichelul* ($57\% \text{ Ni} + 16\% \text{ Cr} + 26\% \text{ Fe} + 1\% \text{ Mn}$). Se folosesc aceste aliaje pentru construirea rezistoarelor, care să aibă rezistențe aproape independente de temperatură. Proprietatea acestor aliaje de a avea coeficientul termic foarte mic se poate arăta cu experiența din figura 2.11, înlocuind spirala din fier R printr-o spirală confecționată din sîrmă a unuia din aliajele menționate mai sus: prin încălzirea spiralei R , intensitatea curentului rămîne practic constantă, deci rezistența nu variază practic cu temperatura. Există o serie de substanțe, numite semiconductoare, a căror rezistivitate scade cînd temperatura crește. Acestea sînt substanțe care au conductivitatea cam de 10^{15} ori mai mică decît conductoarele, fără a fi totuși izolatoare. Asemenea substanțe sînt Ge , Si și alte elemente din grupele IV, V, și VI, Cu_2O , precum și multe minerale. Conductivitatea lor crește odată cu temperatura.

În tabela următoare se dau rezistivitatea și coeficientul termic al rezistivității pentru cîteva substanțe.

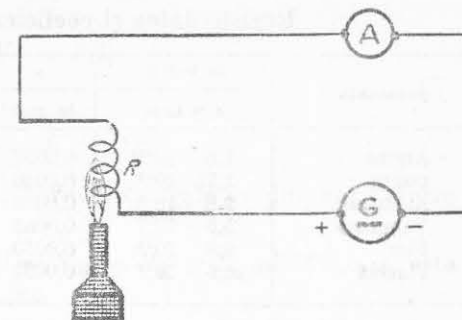


Fig. 2.11

Rezistivitatea și coeficientul termic al rezistivității

Substanța	la 293°K	α în grd^{-1}	Substanța	la 293°K	α în grd^{-1}
	ρ în $\Omega \cdot \text{m}$			ρ în $\Omega \cdot \text{m}$	
Argint	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,0036	Nichelină	$42 \cdot 10^{-8}$	0,0002
Cupru	$1,75 \cdot 10^{-8}$	0,0040	Manganină	$43 \cdot 10^{-8}$	0,00001
Aluminiu	$2,8 \cdot 10^{-8}$	0,0036	Constantan	$50 \cdot 10^{-8}$	0,00001
Tungsten	$5,5 \cdot 10^{-8}$	0,0052	Mercur	$95,8 \cdot 10^{-8}$	0,00089
Fier	$9,8 \cdot 10^{-8}$	0,0050	Crom-nichel	$110 \cdot 10^{-8}$	0,0004
Platină	$10,5 \cdot 10^{-8}$	0,0037	Bismut	$120 \cdot 10^{-8}$	0,004

2.12. **Supraconductibilitatea.** Rezistivitatea metalelor scade când temperatura scade. Fizicianul olandez Kamerlingh Onnes a descoperit (1911) că la mercur se anulează rezistivitatea în vecinătatea lui 0°K , și anume, la $4,15^\circ\text{K}$. Sub această temperatură el se comportă ca un conductor fără rezistență electrică. La fel se comportă plumbul, care își anulează practic rezistivitatea la $7,22^\circ\text{K}$, staniul la $3,73^\circ\text{K}$ (fig. 2.12), niobiul la $9,22^\circ\text{K}$ etc. S-au găsit multe metale și aliaje care prezintă proprietatea de a-și scădea brusc rezistivitatea la o valoare practic nulă, când sînt răcite la o anumită temperatură sub 10°K . Sub temperatura la care își anulează rezistivitatea, aceste substanțe se găsesc în stare de supraconductibilitate, adică nu au rezistență electrică. Astfel, un curent electric indus într-o spirală de plumb ținută în heliu lichid a durat multe zile pînă să înceteze.

2.13. **Legea lui Ohm pe circuitul întreg.** Dacă se parcurge mintal circuitul în sensul $BADCB$ (fig. 2.13) se constată că suma căderilor de tensiune pe întregul circuit este egală cu tensiunea electromotoare E . În aceste condiții se va putea scrie: $IR + Ir = E$, de unde:

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (5)$$

care constituie legea lui Ohm pe întregul circuit. Prin E se înțelege suma algebrică a t.e.m. din circuit, prin R se înțelege rezistența totală a circuitului exterior, prin r , rezistența interioară.

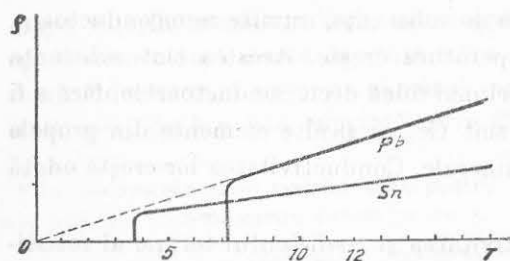


Fig. 2.12

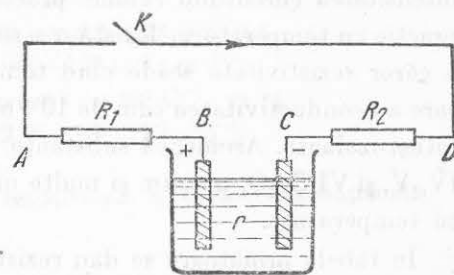


Fig. 2.13

Însă diferența de potențial la borne

$$U = V_B - V_G = IR,$$

incît se mai poate scrie:

$$U = V_B - V_G = E - Ir,$$

adică diferența de potențial (tensiunea) la borne este egală cu diferența dintre t.e.m. și căderea interioară de tensiune.

Cînd circuitul este deschis, $I = 0$ și $U = V_B - V_G = E$, adică t.e.m. este egală cu tensiunea la borne în circuit deschis.

Circuitul deschis (întrerupt) echivalează cu o rezistență infinită introdusă în circuit. Să presupunem că rezistența exterioară a circuitului scade treptat: în aceeași măsură crește intensitatea curentului, deci crește $u = Ir$. Ca urmare, scade tensiunea la borne U . Dacă rezistența exterioară devine zero, atunci $U = RI = 0$, iar $I = \frac{E}{r}$ capătă valoarea maximă pe care o poate da un generator. Se spune că s-a produs *scutcircuit*. Scurtcircuitul reprezintă un pericol pentru generatoarele cu rezistență interioară mică: ele pot fi distruse prin încălzirea foarte mare produsă de intensitatea curentului electric, de asemenea, foarte mare.

2.14. **Reostate.** Reostatul este un aparat format dintr-un rezistor, care are rezistența variabilă. Cu ajutorul lui se poate regla valoarea intensității unui curent electric. De exemplu, tensiunea dată de generator este $U = 12\text{ V}$, iar un bec care trebuie alimentat la această tensiune suportă 2 A și are $3\ \Omega$. Pus la tensiunea de 12 V , receptorul ar fi parcurs de un curent de $\frac{12\text{ V}}{3\ \Omega} = 4\text{ A}$ mult peste valoarea lui nominală. Pentru a-l aduce la funcționare normală se leagă în circuit un rezistor cu rezistență variabilă, care să mărească rezistența circuitului exterior. Reostatele sînt de mai multe feluri.

a. **Reostatul cu cursor** sau cu contact alunecător este cel mai practic (fig. 2.15). Se compune dintr-o sîrmă înfășurată pe un cilindru de porțelan sau alt izulator. Deasupra se găsește o bară metalică B , pe care alunecă cursorul C , în așa fel încît face contact alunecător P cu sîrma reostatului. Cînd cursorul este deplasat spre capătul M , rezistența introdusă în circuit scade și deci

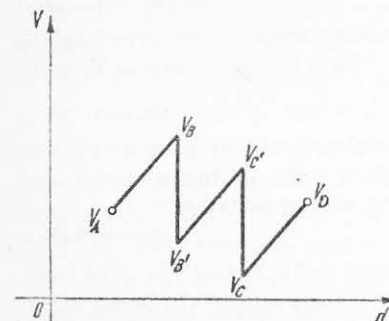


Fig. 2.14

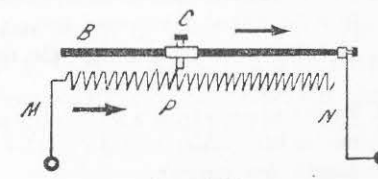


Fig. 2.15

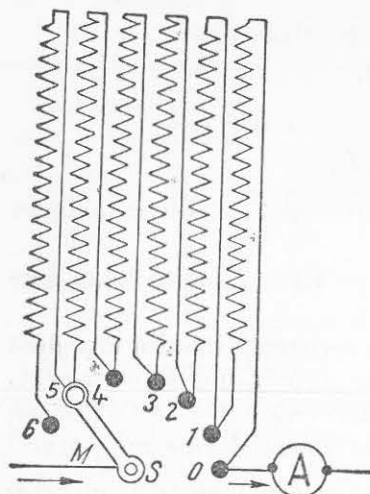


Fig. 2.16

intensitatea curentului reglat crește. Când cursorul ajunge la capătul N , întreaga rezistență a reostatului a fost introdusă în circuit. Cu ajutorul reostatului cu cursor se poate realiza o variație aproape continuă și uniformă a rezistenței, deci o reglare a intensității curentului din circuit.

b. *Reostatul cu manetă* are rezistoare în formă de spirală, legate ca în figura 2.16. Maneta M se poate roti în jurul unui ax S , trecând peste contactele 1, 2, 3... formate din plăcuțe metalice, numite ploturi. Punind maneta pe plotul O , reostatul este scos din circuit și curentul trece de la o bornă la alta numai prin manetă. Când maneta trece pe ploturi de la O la 6, rezistența introdusă în circuit crește. Creșterea rezistenței, deci

variația intensității curentului reglat, se face prin salturi, nu în mod continuu, fiecare salt fiind egal cu rezistența cuprinsă între două ploturi vecine.

Mai există reostate cu lămpi și cutii de rezistență, despre care se va vorbi în lecțiile următoare.

INTREBĂRI, EXERCITII, PROBLEME

1. Ce tensiune trebuie aplicată la bornele unui electromotor care consumă o energie de 4 400 jouli în fiecare secundă, funcționând cu intensitatea de 20 A?

Răspuns: 220 V.

2. Un receptor cu rezistența de 11 Ω este conectat la o tensiune de 220 V, printr-un conductor de 0,4 Ω . Care este căderea de tensiune în conductor și ce tensiune rămâne pentru receptor?

Răspuns: 7,7 V; 212,3 V.

3. Să se calculeze lungimea firului cu rezistența de 1 Ω , făcut din cupru, din aluminiu, din tungsten, din fier, din manganin sau din mercur, având secțiunea de 1 mm².

Răspuns: 57,1 m; 35,7 m; 18,1 m; 10,2 m; 2,32 m; 1,04 m.

4. Ce secțiune are rezistența unui fier de călcat de 24 Ω din crom-nichel, lungă de 6 m?

Răspuns: 0,275 mm².

5. Care este intensitatea curentului electric ce trece printr-o conductă de cupru lungă de 170 m, dacă ea are secțiunea de 16 mm² și este conectată la rețeaua de 220 V, știind că prin ea pierderea este de 6% din tensiune?

Răspuns: 71 A.

6. Un voltmetru indică 12 V la bornele unui acumulator în circuit deschis. Dacă se închide circuitul exterior, format dintr-o rezistență de 5 Ω , voltmetrul indică 11 V la bornele acumulatorului. Ce rezistență interioară are acumulatorul?

Răspuns: 0,455 Ω .

7. Rezistența electrică a înfășurării unui electromotor este de 11 Ω la 15°C. După cteva ore de funcționare ajunge la 13,1 Ω . Care este temperatura înfășurării, știind că este făcută din cupru?

Răspuns: 65,5°.

8. Filamentul unui bec conectat la 2V este parcurs de 0,28 A; conectat la 220 V este parcurs de 4,43 A. Ce valori au rezistențele lui în cele două cazuri? Cu cât a crescut temperatura în al doilea caz, dacă filamentul are coeficientul termic 0,0052 grad⁻¹?

Răspuns: 7,1 Ω ; 49,6 Ω ; $\approx 1151^\circ\text{C}$.

9. Să se construiască graficul de variație a intensității curentului în circuit, în funcție de rezistența circuitului de la 0,5 Ω până la 20 Ω , știind că tensiunea la bornele circuitului este de 40 V. Pe acest grafic să se determine: curentul în circuit pentru rezistențele de 1,5 Ω , 1 Ω , 7 Ω sau 8,7 Ω ; rezistența circuitului la curenții de 15 A sau 7,5 A.

10. Un receptor electric cu rezistența de 2 Ω este alimentat de un generator cu rezistența interioară de 0,3 Ω și t.e.m. de 130 V. Conductoarele prin care se conectează receptorul la generator au fiecare 0,15 Ω . Care este tensiunea la bornele generatorului și care este căderea de tensiune pe linie (pe conductoare)?

Răspuns: 115 V; 15 V.

11. Un element galvanic produce un curent de 0,8 A atunci când circuitul exterior este format dintr-un fir de cupru cu lungimea de 50 m și cu secțiunea de 1,7 mm². Dacă se înlocuiește circuitul exterior printr-un fir de fier lung de 60 m și cu secțiunea de 3 mm², curentul care circulă este de 0,5 A. Ce t.e.m. și ce rezistență interioară are elementul?

Răspuns: 1,93 V; 1,9 Ω .

12. O centrală electrică furnizează curent continuu sub 600 V, energia electrică trebuie transportată la 10 km, cu un curent de 10 A, iar căderea de tensiune pe linia de transport să nu depășească 3%. Ce secțiune vor avea conductoarele de cupru?

Răspuns: 97,2 mm².

13. Un ampermetru indică 2 A într-un circuit simplu. Adăugând în serie o rezistență suplimentară de 1 Ω , ampermetrul indică 0,6 A. Înlocuind rezistența de 1 Ω cu alta necunoscută, ampermetrul indică $\frac{72}{57}$ A. Se cer: rezistența necunoscută și t.e.m. a sursei din circuit.

Răspuns: 0,25 Ω ; 0,857 V.

C. CURENȚI RAMIFICAȚII

2.15. *Rețele electrice.* Până aici ne-am ocupat numai de circuite electrice neramificate. Folosirea în practică a energiei electrice se face de cele mai multe ori cu ajutorul unor circuite electrice complicate, numite rețele electrice. Privind în interiorul unui aparat de radio, se observă o mulțime de sirme care se încrucișează în nenumărate puncte. Acestea formează o *rețea electrică*. Ea este alcătuită din mai multe ramificații prin care circulă curenți de diferite intensități.

Oricât de complexă ar fi o rețea electrică, ea are două elemente constitutive: *nodul rețelei* și *ochiul de rețea* (fig. 2.17). Nod de rețea este punctul de întâlnire a cel puțin trei conductoare. Ochiul de rețea este o succesiune de laturi formând o curbă închisă. Exemplele de noduri: A, B, C, D și F; exemple de ochiuri de rețea: ABCDA, ADFA și ABCDFA. G.R. Kirchhoff a demonstrat în 1847, două teoreme pentru nodurile și ochiurile rețelelor electrice. Cu ajutorul lor se pot scrie relații între intensitățile, rezistențele și tensiunile unui circuit oricât de complicat.

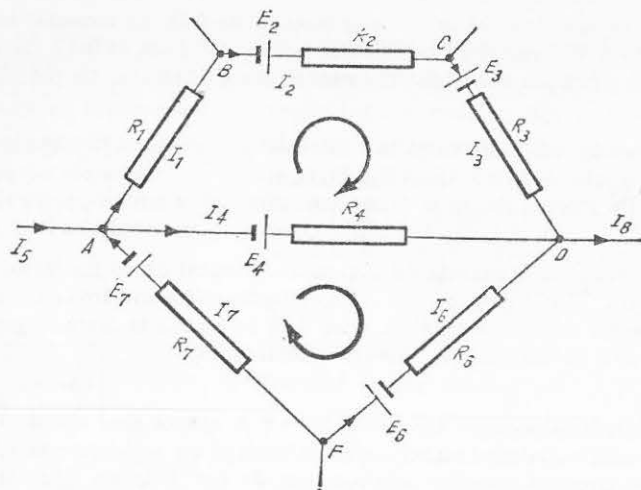


Fig. 2.17

2.16. Prima teoremă a lui Kirchhoff. Prima teoremă a lui Kirchhoff se referă la noduri și se bazează pe legea conservării sarcinilor electrice: în orice punct al unui circuit electric, suma sarcinilor care intră în acel punct trebuie să fie egală cu suma sarcinilor care ies în același interval de timp. Deci și suma intensităților curenților care intră într-un nod este egală cu suma intensităților ce ies. Pentru nodul A (fig. 2.17) se va putea scrie:

$$I_5 + I_7 = I_1 + I_4 \text{ sau}$$

$$I_5 + I_7 - I_1 - I_4 = 0;$$

pentru nodul D : $I_4 + I_6 + I_3 = I_8$ sau $I_4 + I_6 + I_3 - I_8 = 0$ etc.

Considerind cu semnul (+) intensitățile curenților care vin spre nod și cu semnul (−) intensitățile curenților care ies din nod, se poate spune că:

Suma algebrică a intensităților curenților care se întâlnesc într-un nod este egală cu zero.

Analitic se poate scrie:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1)$$

Experiență. Prin închiderea întrerupătorului K din figura 2.18 se constată că indicațiile ampermetrelor arată că $I = I_1 + I_2 + I_3$, ceea ce confirmă experimental prima teoremă a lui Kirchhoff.

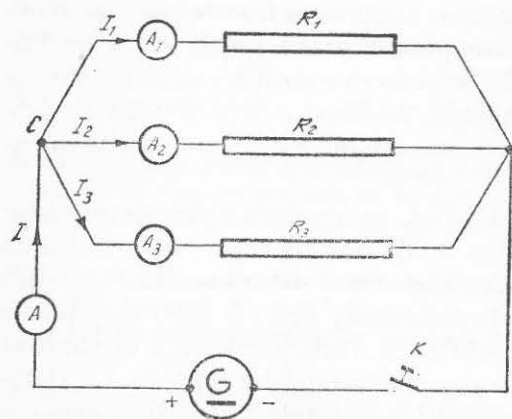


Fig. 2.18

Observație. Pentru rezolvarea problemelor se va ține seama că, deși se poate scrie relația (1) pentru fiecare din cele n noduri ale rețelei, se obțin ecuații independente numai pentru $n - 1$ noduri; ultima ecuație decurge din cele precedente. În figura 2.17 sunt cinci noduri, deci se pot scrie patru ecuații independente.

2.17. A doua teoremă a lui Kirchhoff. Se aplică la ochiurile de rețea. Fie ochiul de rețea ABCDA (fig. 2.17) în care considerăm fiecare porțiune dintre două noduri consecutive (*latură*). Dacă se consideră potențialele la capetele fiecărei laturi, E fiind tensiunea electromotoare pe această porțiune de circuit, aplicând legea lui Ohm pentru ochiul de rețea ABCDA se poate scrie: pe ramura AB:

$$V_A - V_B = I_1 R_1;$$

pe ramura BC:

$$E_2 = V_C - V_B + I_2(r_2 + R_2)$$

sau

$$V_B - V_C + E_2 = I_2(r_2 + R_2);$$

pe ramura CD:

$$-E_3 = V_D - V_C + I_3(r_3 + R_3)$$

sau

$$V_C - V_D - E_3 = I_3(r_3 + R_3);$$

pe ramura DA:

$$E_4 = V_D - V_A + I_4(r_4 + R_4)$$

sau

$$V_D - V_A - E_4 = -I_4(r_4 + R_4).$$

Adunând membru cu membru se obține:

$$I_1 R_1 + I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) - I_4(R_4 + r_4) = E_2 - E_3 - E_4.$$

Se observă că se poate alege arbitrar la început un sens de parcurs al conturului ochiului de rețea, de exemplu, sensul orar. Semnul produsului RI este pozitiv atunci când sensul ales pentru curent coincide cu sensul ales pentru parcurs; semnul pentru t.e.m. E este considerat pozitiv atunci când sensul de parcurs prin interiorul generatorului este de la polul − la polul +. De exemplu, pe ramura BC, sensul curentului este pozitiv, iar sensul t.e.m. E_2 este tot



Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887). Fizician german. A descoperit legile curenților derivați (1847). A studiat radiația corpului negru și a descoperit una din legile acestei radiații. Împreună cu R. Bunsen a descoperit inversiunea liniei spectrale a sodiului (rezonanță optică) și a pus bazele analizei spectrale (1859).

pozitiv; pe ramura CD semnul curentului este pozitiv, iar semnul t.e.m. E_3 este negativ. Pe ramura DA atât I_4 cât și E_4 sînt negative.

Deci:

De-a lungul conturului unui ochi de rețea, suma algebrică a t.e.m. este egală cu suma algebrică a produselor dintre intensitate și rezistența totală din fiecare ramură. Este a doua teoremă a lui Kirchhoff. Generalizînd, ea se poate scrie astfel:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n I_k R_k. \quad (2)$$

Pentru ochiul de rețea $ADFA$, ea se scrie:

$$E_4 + E_6 - E_7 = I_4(R_4 + r_4) - I_6(R_6 + r_6) + I_7(R_7 + r_7).$$

Observație: Teorema a doua a lui Kirchhoff permite scrierea unei ecuații pentru fiecare ochi al unei rețele electrice. La rezolvarea problemelor se ține seamă însă că se obțin ecuații independente numai pentru ochiurile de rețea fundamentale*. De exemplu, în rețeaua din figura 2.17 sînt posibile trei ochiuri de rețea: $ABCD$, $ADFA$ și $ABCDFA$. Ochiuri de rețea fundamentale sînt însă numai ochiurile de rețea $ABCD$ și $ADFA$. Deci se pot scrie, în acest caz, numai două ecuații independente. În general, dacă l este numărul de laturi, iar n acela al nodurilor, se pot scrie $l - n + 1$ ecuații independente prin aplicarea teoremei a doua a lui Kirchhoff.

Cu ajutorul celor două teoreme ale lui Kirchhoff se pot rezolva multe probleme ale circuitelor electrice complexe. Pentru un circuit neramificat, a doua teoremă a lui Kirchhoff devine legea lui Ohm pe întregul circuit. Aplicînd teorema a doua la circuitul din figura 2.13 se obține: $E = I(R + r)$, adică tocmai relația 5 (§2.13). Dacă în circuitul ramificat nu există surse electrice,

$$\text{atunci } \sum_{k=1}^n E_k = 0, \quad \text{deci } \sum_{k=1}^n I_k R_k = 0.$$

2.18. Rezistența echivalentă a rezistoarelor grupate în serie. Mai multe rezistoare de rezistență R_1, R_2, R_3 sînt conectate în serie (fig. 2.19). Se caută

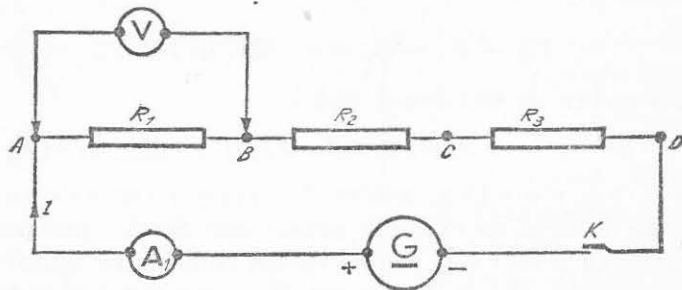


Fig. 2.19

* Care nu sînt realizate prin suprapunerea celor precedente.

valoarea rezistenței echivalente, adică rezistența R a rezistorului care, fiind conectat între punctele A și D , poate înlocui rezistoarele de rezistențe R_1, R_2, R_3 , fără a modifica intensitatea I a curentului din circuit. Cu ajutorul voltmetrului V se măsoară succesiv diferențele de potențial dintre punctele AB, BC, CD , adică tensiunile U_1, U_2, U_3 dintre capetele fiecărui rezistor, apoi tensiunea U între capetele extreme AD ale rezistoarelor înseriate. Se constată că: $U = U_1 + U_2 + U_3$. Ținînd seama de legea lui Ohm, $U = IR$, se poate scrie:

$$RI = R_1I + R_2I + R_3I = (R_1 + R_2 + R_3)I,$$

adică

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

Generalizînd pentru n rezistoare conectate în serie, se va scrie:

$$R = \sum_{k=1}^n R_k. \quad (3)$$

Rezistența echivalentă a mai multor rezistoare conectate în serie este egală cu suma rezistențelor acelor rezistoare.

2.19. Rezistența echivalentă a rezistoarelor conectate în paralel. Mai multe rezistoare avînd rezistențele R_1, R_2, R_3 (fig. 2.20) sînt conectate în paralel sau derivație, dacă se leagă în același punct B unul din capetele fiecărui rezistor, iar în alt punct C , al doilea capăt al fiecărui rezistor. Fiecare rezistor are între capetele lui aceeași tensiune U , fiind parcurs fiecare de un curent I_1, I_2, I_3 . Se caută valoarea rezistenței echivalente, adică rezistența R a unui rezistor care să poată înlocui rezistențele R_1, R_2, R_3 , fără a modifica intensitatea $I = \frac{U}{R}$ a curentului din circuit. Se aplică prima teoremă a lui Kirchhoff

în nodul B : $I = I_1 + I_2 + I_3$. Ținînd seamă de legea lui Ohm (2, §2.8), se poate scrie:

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

sau:

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

sau încă:

$$G = G_1 + G_2 + G_3.$$

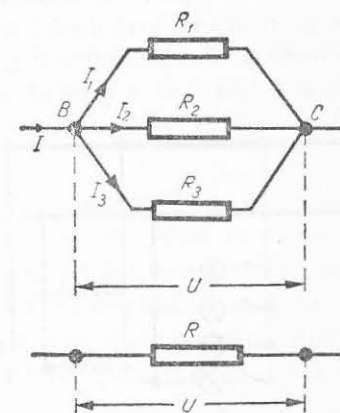


Fig. 2.20

Generalizind pentru n rezistoare conectate în paralel:

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (4)$$

sau

$$G = \sum_{k=1}^n G_k \quad (4')$$

Inversul rezistenței echivalente a unui fascicul de rezistoare conectate în paralel este egal cu suma inverselor rezistențelor acelor rezistoare. Sau: conductanța echivalentă a mai multor rezistoare conectate în paralel este egală cu suma conductanțelor acelor rezistoare.

Dacă cele n rezistoare au aceeași rezistență R_1 , atunci relația (4) devine:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_1} = \frac{n}{R_1},$$

de unde:

$$R = \frac{R_1}{n},$$

adică: rezistența echivalentă R a n rezistențe egale R_1 conectate în paralel este $1/n$ din valoarea unei singure rezistențe.

Receptoarele electrice, alimentate de la aceeași rețea electrică, trebuind să poată funcționa, fie toate odată, fie separat fiecare, se conectează în paralel. Deconectarea unuia dintre ele nu împiedică funcționarea celorlalte. În figura 2.21, L reprezintă mai multe lămpi electrice, R două reșouri, M un electromotor.

2.20. Gruparea generatoarelor electrice. Mai multe generatoare electrice se grupează în serie dacă borna negativă a fiecăruia se leagă cu borna pozitivă a următorului generator (fig. 2.22, a). Să considerăm trei generatoare identice cu aceeași t.e.m. E și cu aceeași rezistență interioară r , grupate în serie, avind

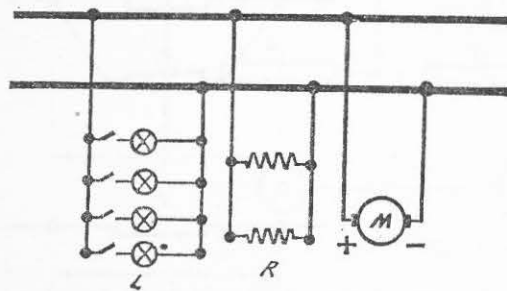


Fig. 2.21

în circuitul exterior un rezistor cu rezistența R . Aplicind circuitului format teorema a doua a lui Kirchhoff, se obține:

$$E + E + E = IR + Ir + Ir + Ir$$

sau:

$$3E = I(R + 3r),$$

$$I = \frac{3E}{R + 3r}.$$

Generalizind pentru n generatoare identice, se obține:

$$I = \frac{nE}{R + rn} \quad (5)$$

Gruparea în serie este folosită pentru a obține la bornele rezistenței R o tensiune electrică mare. Ea este avantajoasă numai dacă rezistența interioară a fiecărui generator e mică, deoarece $U = nE - Inr$. Pentru valori mari ale lui r , căderea interioară de potențial Inr crește, deci U scade; cind $r \approx 0$, $U \approx nE$.

Cele n generatoare identice se pot grupa în paralel, legind la un loc bornele lor pozitive, iar cele negative, de asemenea, la un loc (fig. 2.22, b). Aplicind teoremele lui Kirchhoff, se constată că ansamblul este echivalent cu un generator, avind t.e.m.

egală cu t.e.m. E a fiecărui generator în parte, iar rezistența interioară $\frac{r}{n}$.

Legea lui Ohm (5, § 2.13) ia forma:

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} \quad (6)$$

Gruparea în paralel este folosită pentru a obține un curent de n ori mai intens decât curentul pe care l-ar putea furniza, fără pericol, un singur generator. Este neapărat necesar, în acest scop, ca generatoarele să fie identice, altfel rezultă curenți inverși în generatoare.

2.21. Șuntul ampermetrelor. O rezistență electrică legată în paralel la bornele unui ampermetru pentru a-i mări domeniul de măsurare se numește *șunt**. Dacă trebuie măsurată o intensitate $I = nI_A$ de n ori mai mare decât intensitatea maximă I_A pe care o poate măsura un instrument de măsurat A (fig. 2.23), se leagă rezistența șunt R_s între bornele A și B ale instrumentului. Intensitatea I se împarte în două părți: una I_A trece prin instrumentul de

* Din limba engleză: *shunt* = linie de ferire.

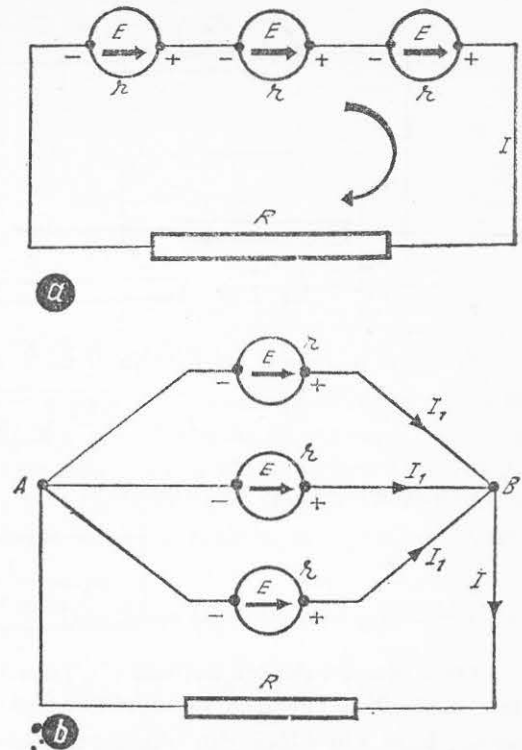


Fig. 2.22

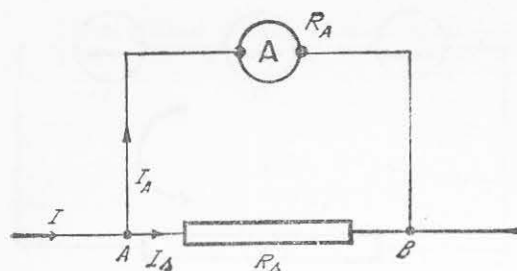


Fig. 2.23

măsurat A , iar restul I_s trece prin șunt. Valoarea acestuia trebuie calculată astfel încât să se cunoască raportul de împărțire a intensității I de măsurat. În nodul A se scrie:

$$\begin{aligned} I &= I_A + I_s \text{ sau} \\ nI_A &= I_A + I_s \\ I_s &= (n-1)I_A. \end{aligned}$$

Teorema a doua a lui Kirchhoff dă $I_A R_A - I_s R_s = 0$, de unde:

$$I_s = \frac{I_A R_A}{R_s} = (n-1)I_A.$$

Valoarea șuntului va fi deci:

$$R_s = \frac{R_A}{n-1}. \quad (7)$$

Dacă R are valoarea dată de (7), atunci curentul de măsurat I este de n ori mai mare decât valoarea I_A citită la ampermetru. Șunturile se fac în formă de sîrme, bare sau plăci, din aliaje cu coeficientul termic neglijabil. Șuntul se montează în interiorul instrumentului de măsurat ori se introduce într-o cutie separată și se conectează la instrument numai cînd e nevoie de el. Un anumit șunt nu-i valabil pentru orice ampermetru, ci numai pentru acelea care au aceeași rezistență interioară R_A .

2.22. Voltmetrul și rezistența lui adițională. Pentru a măsura căderea de potențial $U = RI$ de-a lungul unei rezistențe R , parcursă de curentul I (fig. 2.24, a), se conectează voltmetrul V la bornele AB ale rezistenței (fig. 2.24 b). Dar voltmetrul însuși are o rezistență R_v , încît între punctele A și B va fi o rezistență echivalentă R' dată de relația:

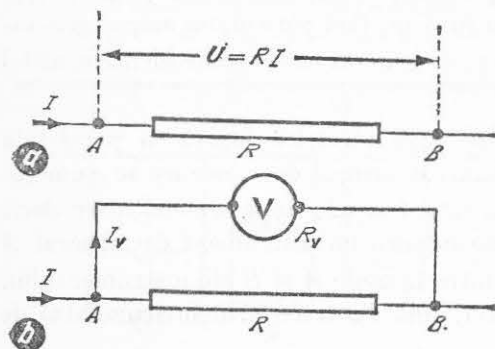


Fig. 2.24

$$\begin{aligned} \frac{1}{R'} &= \frac{1}{R} + \frac{1}{R_v} = \frac{R + R_v}{R R_v} \\ R' &= \frac{R}{1 + \frac{R}{R_v}} < R. \end{aligned}$$

Deci tensiunea măsurată $U_{max} = IR' < U$.

Pentru ca tensiunea măsurată să fie cea adevărată U , trebuie ca $R' \approx R$, adică R_v să fie foarte

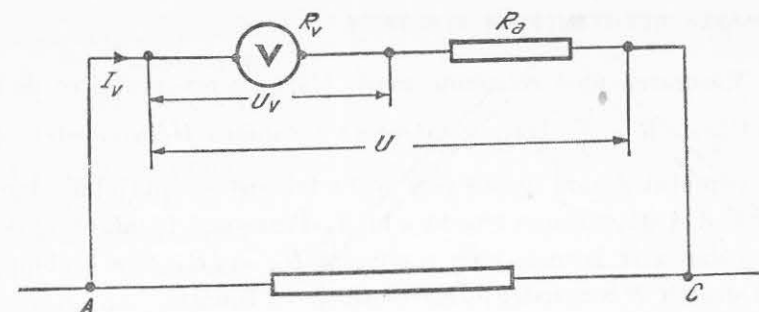


Fig. 2.25

mare față de R . Așadar, voltmetrul trebuie să aibă rezistență mare și se conectează în paralel cu rezistorul, la capetele căruia trebuie să măsoare tensiunea.

Dacă tensiunea de măsurat U este mai mare decât tensiunea maximă U_v pe care o poate măsura voltmetrul V , adică $U = nU_v$ (fig. 2.25), se leagă în serie cu acesta o rezistență adițională R_a . Pe rezistența R_a se distribuie excesul de tensiune U_a .

Se va putea scrie $I_v = \frac{U_v}{R_v} = \frac{U_a}{R_a}$. Dar $U = U_v + U_a \Rightarrow U_a = U - U_v = (n-1)U_v$.

Introducînd în expresia lui I_v , se obține: $\frac{U_v}{R_v} = \frac{(n-1)U_v}{R_a}$. De unde

$$R_a = R_v(n-1). \quad (8)$$

2.23. Divizorul de tensiune (potențiometrul). Pentru a utiliza numai o parte U_1 din tensiunea U de la bornele unui generator se folosește un aparat numit divizor de tensiune sau potențiometrul, care constă dintr-un reostat cu cursor, cu trei borne A, B, D (fig. 2.26). La bornele AB este conectată tensiunea U furnizată de generator; la bornele AD se conectează receptorul care primește tensiunea $U_1 \leq U$. Valoarea lui U_1 depinde de poziția cursorului C : ea scade cînd C este deplasat către A și crește cînd C este deplasat spre B . Dacă borna A este legată la pămînt printr-un fir metalic, borna A are potențialul zero, deci U_1 poate crește de la zero la $+U$. Dacă se leagă la pămînt borna B , atunci U_1 poate varia de la zero la $-U$. Punînd la pămînt mijlocul M al reostatului, U_1 poate varia de la zero la $-\frac{U}{2}$ cînd C este deplasat de la M către A , ori de la zero la $+\frac{U}{2}$, cînd cursorul C este deplasat de la M către B .

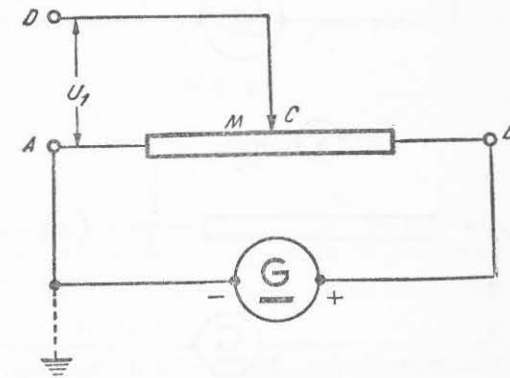


Fig. 2.26

D. MĂSURAREA REZISTENȚELOR ELECTRICE

2.24. Măsurarea unei rezistențe mari. Mărimea rezistenței se deduce din legea lui Ohm: $R = \frac{U}{I}$. Trebuie măsurată tensiunea U la capetele rezistenței R și curentul I care circulă prin R . Se folosește montajul din figura 2.27. Ampermetrul A dă valoarea exactă a lui I . Tensiunea U măsurată de V conține și tensiunea la bornele ampermetrului $U_A = IR_A$, care trebuie scăzută din U . Valoarea R a rezistenței de măsurat va fi deci:

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

Rezistența ampermetrului este însă foarte mică față de valoarea lui R de măsurat, deci se poate neglija IR_A față de U , încît:

$$R \approx \frac{U}{I}$$

valoare foarte apropiată de valoarea reală R .

2.25. Măsurarea unei rezistențe mici. Montajul folosit în acest caz este cel din figura 2.28. Voltmetrul V indică valoarea exactă U dintre bornele A și B ale lui R . Însă intensitatea I dată de A conține și intensitatea $I_v = \frac{U_v}{R_v}$ care circulă prin voltmetru și deci trebuie scăzută din I .

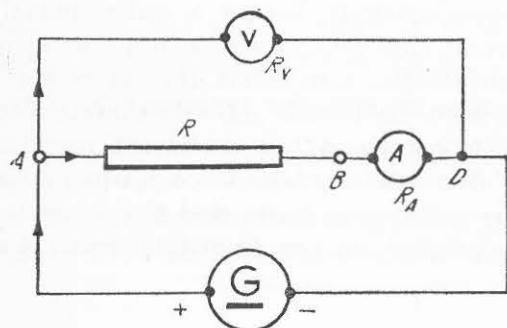


Fig. 2.27

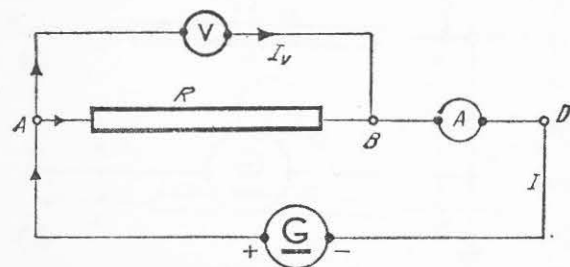


Fig. 2.28

Valoarea R a rezistenței de măsurat va fi deci:

$$R = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U_v}{R_v}}.$$

Deoarece voltmetrul are rezistența R_v foarte mare față de R , I_v poate fi neglijat față de I , încît:

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

valoare foarte apropiată de valoarea reală R .

2.26. Compararea a două rezistențe cu puntea cu fir. Se poate compara o rezistență necunoscută R cu o alta cunoscută R_0 , folosind

montajul din figura 2.29, numit *puntea cu fir*. Nu interesează valoarea rezistențelor R_1 și R_2 , dar raportul lor trebuie să poată fi determinat cu exactitate. Între punctele C și D se află puntea propriu-zisă, care conține un instrument foarte sensibil de măsurat curentul, galvaometrul G . Punctul C poate aluneca între A și B pe un fir conductor calibrat. Acest fir constituie două rezistoare de rezistențe R_1 și R_2 , legate în serie.

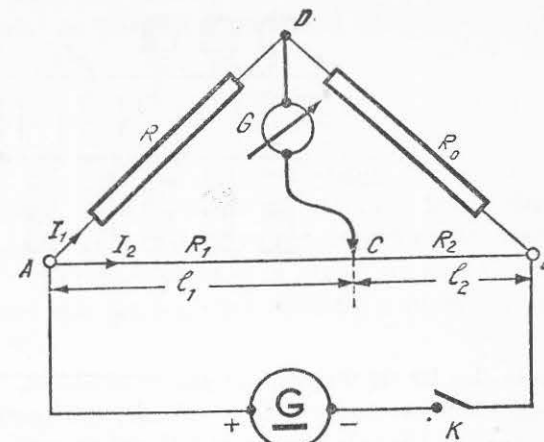


Fig. 2.29

Se deplasează cursorul pe fir pînă într-un punct C , cînd prin puntea CD nu mai circulă curent electric: acul galvanometrului nu mai deviază la închiderea-deschiderea repetată a întrerupătorului K . Înseamnă că potențialele din D și din C sînt egale, prin R și R_0 circulă același curent I_1 , iar prin R_1 și R_2 circulă același curent I_2 . Se poate scrie că tensiunile U_{AD} și U_{AC} sînt egale între ele:

$$I_1 R = I_2 R_1$$

și, de asemenea, tensiunile U_{DB} și U_{CB} :

$$I_1 R_0 = I_2 R_2.$$

Se poate deduce prin împărțire: $\frac{R}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}$, de unde: $R = \frac{R_1}{R_2} R_0$.

Notînd cu l_1 , respectiv l_2 , lungimile firului, care constituie rezistențele R_1 și R_2 , se observă că:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2},$$

materialul fiind același, ρ este același. (Secțiunea firului este constantă.) Prin urmare:

$$R = \frac{l_1}{l_2} R_0.$$

Lungimile l_1 și l_2 se află cu ajutorul unei rigle gradate, așezate de-a lungul firului AB . Valorile cele mai exacte pentru R se obțin cînd R_0 nu diferă prea mult de R . Ca rezistență etalon R_0 se folosește, de obicei, o cutie de rezistențe, din care se poate alege cel mai convenabil R_0 .

2.27. Cutia de rezistențe. Este o grupare de rezistoare avînd rezistențe etalonate, legate în serie și introduse într-o cutie de lemn. Rezistoarele sînt

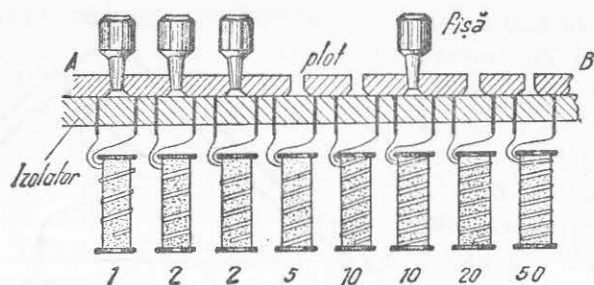


Fig. 2.30

făcute din fir de manganină sau constantan, înfășurate bifilar (pentru reducerea efectelor magnetice) pe cilindri din material izolator. Capetele fiecărui rezistor sînt lipite la cite un plot (lamă groasă) de alamă. Diferitele ploturi sînt separate unul de altul (fig. 2.30) prin spații goale. În aceste spații se pot introduce fișe care pun în contact două ploturi alăturate. Valorile rezistențelor sînt scrise pe capacul cutiei, în dreptul fișei corespunzătoare. Aceste valori sînt așa fel alese încît se pot realiza variate combinații de valori. Presupunem situația din figura 2.30 unde sînt introduse fișele 1, 2, 3 și 6, iar fișele 4, 5, 7 și 8 sînt scoase. Curentul intră prin plotul A, trece prin cele trei fișe următoare, care scurtcircuitează rezistențele 1 Ω , 2 Ω , și 2 Ω , trece apoi prin rezistențele de 5 Ω și 10 Ω , prin fișa care scurtcircuitează a doua rezistență de 10 Ω , continuă să treacă prin rezistențele 20 Ω și 50 Ω și iese prin plotul final B. Curentul trece numai prin rezistoarele corespunzătoare fișelor scoase. În situația analizată aici se introduce o rezistență de 5 Ω + 10 Ω + 20 Ω + 50 Ω = 85 Ω . Există și alte tipuri de cutii de rezistențe cu fișe sau cu manetă.

2.28. Ohmmetrul. Pentru măsurarea rapidă și directă a rezistențelor nu prea mici se folosește ohmmetrul simplu. Se bazează pe măsurarea unei rezistențe cu ajutorul unui voltmetru V (fig. 2.31, a) cu rezistența R cunoscută. La închiderea întrerupătorului K, rezistența de măsurat este scurtcircuitată, iar voltmetrul V indică tensiunea U de la bornele generatorului. La deschi-

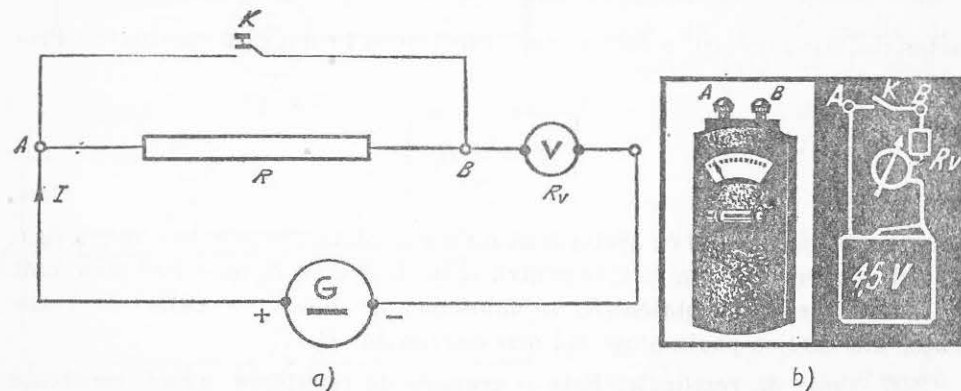


Fig. 2.31

derea întrerupătorului K, voltmetrul V indică numai tensiunea U_v de la bornele sale. La bornele rezistenței de măsurat R va fi deci o tensiune

$$U_1 = U - U_v = IR = \frac{U_v}{R_v} R. \text{ De aici se deduce:}$$

$$R = \frac{U - U_v}{U_v} R_v.$$

Întregul montaj, inclusiv bateria de alimentare, se introduce într-o cutie, lăsîndu-se accesibile în exterior bornele între care se conectează rezistența de măsurat (fig. 2.31, b). Scala este gradată în volți și în ohmi, și anume, astfel încît la scurtcircuitare (întrerupătorul închis), cînd deviația e maximă, acul indică valoarea zero a rezistenței.

INTREBĂRI, EXERCITII, PROBLEME

1. Generatoarele cu $E_1 = 48$ V și $E_2 = 45$ V avînd rezistențe interioare neglijabile sînt legate ca în figura 2.32, prin rezistoarele de rezistențe $R_1 = 2$ Ω , $R_2 = 3$ Ω și $R_3 = 4$ Ω . Se cer intensitățile în fiecare ramură.

Răspuns: 6 A; 3 A; 9 A.

2. Două elemente galvanice identice, cu t.e.m. de 2 V, se leagă în serie printr-un rezistor de rezistență $R = 3$ Ω . Știînd că unul singur din cele două elemente ar debita prin R curentul de 0,5 A, se întreabă care-i curentul în cazul legării în serie? Dar dacă cele două elemente ar fi legate în paralel, printr-un conductor de aceeași rezistență?

Răspuns: 0,8 A; 0,57 A.

3. Conductorul de rezistență R din problema precedentă se taie în trei părți egale și se montează ca în figura 2.33. Se cer curenții din fiecare latură.

Răspuns: 1 A; 0,5 A; 0,5 A.

4. Unui potențiomtru cu rezistența de 4 k Ω i se aplică la borne o tensiune de 110 V. Un voltmetru cu rezistența de 10 k Ω este legat între un capăt al potențiometrului și cursor. Ce tensiune indică voltmetrul, cînd cursorul se află la mijlocul înfășurării potențiometrului?

Răspuns: 50 V.

5. Un circuit este format din nouă conductoare, avînd fiecare rezistența r. Cele nouă conductoare formează un hexagon, cu diagonalele plecînd din același vîrf A. Se cere

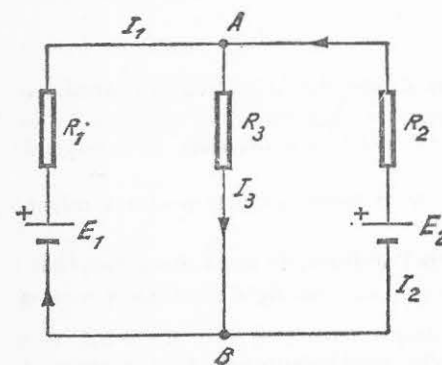


Fig. 2.32

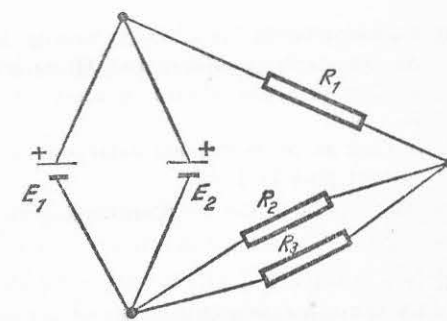


Fig. 2.33

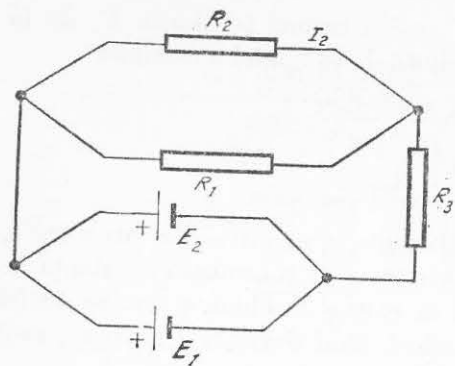


Fig. 2.34

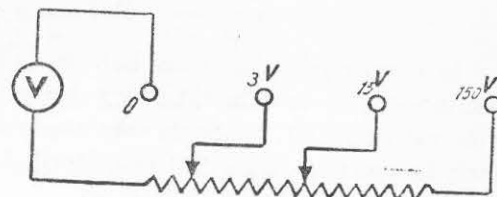


Fig. 2.35

rezistența echivalentă a circuitului între punctele A și B , de la extremitatea diagonalei celei mai lungi.

Răspuns: $\frac{5r}{11} \Omega$.

6. O baterie debitează, pe o rezistență exterioară de 10Ω , un curent de 3 A . Dacă se înlocuiește rezistența exterioară cu una de 20Ω , atunci curentul are $1,6 \text{ A}$. Ce tensiune electromotoare și ce rezistență interioară are bateria?

Răspuns: $34,3 \text{ V}$; $1,43 \Omega$.

7. Două elemente galvanice E_1 și E_2 , cu t.e.m. de 2 V și rezistența interioară de 4Ω fiecare (fig. 2.34) alimentează o rețea electrică formată din rezistoare de rezistențe $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 2,1 \Omega$. Ce tensiune este la bornele rezistorului R_3 , și ce curent circulă prin rezistorul R_2 ?

Răspuns: $0,665 \text{ V}$; $0,176 \text{ A}$.

8. Un voltmetru a cărui schemă se vede în figura 2.35 are scala împărțită în 150 de diviziuni. El are trei borne pentru măsurarea tensiunilor până la 3 V , până la 15 V și până la 150 V . La trecerea prin instrument a unui curent de 1 mA , acul deviază cu 50 de diviziuni. Care este rezistența instrumentului pentru fiecare sensibilitate?

Răspuns: $1\,000 \Omega$; $5\,000 \Omega$; $50\,000 \Omega$.

9. Ce valoare trebuie să aibă șuntul unui galvanometru cu ac indicator, a cărui scală are 100 de diviziuni, iar fiecare diviziune corespunde unui curent de $1 \mu\text{A}$? Galvanometrul are rezistența interioară de 150Ω și urmează a fi utilizat la măsurarea curenților până la 1 mA .

Răspuns: $16,67 \Omega$.

10. Un ampermetru are scala de 100 de diviziuni și măsoară $10 \mu\text{A}$ pentru o diviziune. Are rezistența interioară 100Ω . Se cer:

- a. Cum se poate măsura cu acest ampermetru, astfel ca o diviziune să corespundă la 1 V ?
b. Cum se poate extinde domeniul de măsurare al ampermetrului pentru a măsura curenți până la 1 A ?

(Concursul de admitere la Facultatea de fizică, București, 1964.)

Răspuns: $R_S = 99\,900 \Omega$; $R = 0,1 \Omega$.

11. O rezistență R a fost măsurată folosind un ampermetru care are $R_A = 0,5 \Omega$ și un voltmetru de rezistență $R_V = 500 \Omega$, conectat la bornele sursei. Aceasta are rezistența interioară neglijabilă. Voltmetrul a indicat 20 V , iar ampermetrul 4 A . Se cer:

a. Valoarea exactă a lui R .

b. Când este mai precisă măsurătoarea lui R , în cazul de mai sus, ori când voltmetrul e conectat la bornele rezistorului de rezistență R ?

(Olimpiada de Fizică, etapa republicană, 1964.)

Răspuns: $4,5 \Omega$; în cazul b.

12. Un circuit este format dintr-o sursă cu t.e.m. de 16 V și $r = 2 \Omega$, un fir de cupru cu rezistența R_1 (având diametrul de $0,2 \text{ mm}$ și lungimea $6,28 \text{ m}$), un reostat variabil și un ampermetru cu rezistență neglijabilă, toate în serie.

a. Care este tensiunea la bornele sursei, dacă ampermetrul indică 1 A ?

b. La bornele firului de cupru se leagă în paralel al doilea fir de rezistență R_2 din același material și aceeași lungime cu primul, dar de secțiune dublă. Ce valoare trebuie să aibă reostatul R pentru ca ampermetrul să indice 1 A ?

c. M și N fiind mijloacele firelor R_1 și R_2 , ce va indica un voltmetru legat între aceste 2 puncte?

(Olimpiada de Fizică, etapa regională, 1963.)

Răspuns: 16 V ; $14,83 \Omega$; 0 V .

E. ENERGIE ELECTRICĂ

2.29. Energia electrică dezvoltată într-un circuit electric. Prin efectele sale, curentul electric are numeroase aplicații practice. În toate aceste aplicații prin intermediul câmpului electric din interiorul conductoarelor, energia generatorului este transmisă receptoarelor, unde se transformă în diferite forme de energie. Deci, conductorul electric ghidează transmiterea energiei de la generator la receptor. Astfel, în electromotorul unui strung sau al tramvaiului, energia electrică se transformă în energie mecanică; în sobe electrice, radiatoare, reșouri, energia electrică se transformă în energie internă; în becul electric ea se transformă în energie luminoasă etc.

Energia electrică, dezvoltată într-un conductor electric, se poate calcula în felul următor. Se știe că un curent electric constă din transportul dirijat al purtătorilor de sarcină electrică. Purtătorii de sarcină q se mișcă de la un punct la altul al circuitului electric sub căderea de tensiune U dintre cele două puncte. Lucrul mecanic efectuat de forțele electrice pentru transportul sarcinii q în curent continuu va fi:

$$L = Uq = UIt.$$

Acest lucru mecanic măsoară energia care se transformă în circuit în intervalul de timp t , din energie electrică în alte forme de energie:

$$W = UIt. \quad (1)$$

Așadar, energia electrică dezvoltată într-un circuit de curent continuu este proporțională cu tensiunea, cu intensitatea și cu durata de timp considerată. (Energia electrică nu este energia curentului electric, ci a câmpului electromagnetic din conductor. Din relația (1) se observă că energia poate varia chiar dacă I este constant.)

Pe întregul circuit închis al unui curent continuu, alimentat de un generator cu t.e.m. E și rezistența interioară r , energia electrică dezvoltată de sursă va fi:

$$W = EIt \quad (2)$$

Această energie provine din energiile neelectrice, care în generator (v. paragraful 2.2) se transformă în energie electrică.

Energia electrică se măsoară în joule, în SI . În practică se mai folosește o unitate mai mare, numită kilowatt-oră. ($1 \text{ kWh} = 10^3 \cdot 3600 \text{ W} \cdot \text{s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ joule}$.)

2.30. Puterea electrică. Energia dezvoltată în unitatea de timp se numește putere. Puterea electrică dezvoltată pe o porțiune de circuit va fi deci:

$$P = UI \quad (3)$$

iar puterea dezvoltată de o sursă va fi:

$$P = EI \quad (4)$$

Unitatea de putere este wattul: $W = \frac{J}{s}$. În practică se folosește kilowattul, un multiplu al wattului.

2.31. Efectul electrocaloric: legea lui Joule. În orice conductor parcurs de curent electric se dezvoltă căldură (efect electrocaloric), cum s-a arătat mai înainte (§2.4).

În procesul de conducție electrică, energia electromagnetică a cîmpului se transformă ireversibil în energie internă a conductoarelor și se transmite în mediul ambiant sub formă de căldură. Pe baza principiului conservării energiei, cantitatea de căldură Q dezvoltată în regim staționar este egală cu energia electrică transformată:

$$Q = UIt = RI^2t \quad (5)$$

Fizicianul J.P. Joule (1818—1889) a măsurat experimental (1841) cantitatea de căldură dezvoltată de curentul electric și a găsit legea scrisă mai sus sub formă matematică.

James Prescott Joule (1818—1889). Fizician englez. A studiat efectul electrotermic și a descoperit legea care îi poartă numele (1846). A determinat experimental echivalentul mecanic al caloriei (1845). A studiat răcirea gazelor prin destindere și a descoperit că energia internă a gazului perfect nu depinde de volum (1852).

Cantitatea de căldură dezvoltată la trecerea curentului electric printr-un conductor este proporțională cu rezistența, cu pătratul intensității și cu timpul cît circulă curentul electric.

Aceasta este legea lui Joule sau legea efectului electrocaloric. Cantitatea de căldură se exprimă aici în joule, rezistența în ohmi, intensitatea în amperi și timpul în secunde.

Energia disipată* într-un rezistor va fi deci:

$$P = RI^2,$$

iar în întregul circuit va fi:

$$P = (R + r)I^2.$$

Randamentul η al unui circuit închis de curent continuu, format dintr-un generator cu t.e.m. E și rezistența interioară r , precum și dintr-un receptor cu rezistența R , va fi:

$$\eta = \frac{\text{puterea primită de receptor}}{\text{puterea dezvoltată de sursă}},$$

adică:

$$\eta = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}, \text{ sau } \eta = \frac{RI^2}{(R + r)I^2} = \frac{R}{R + r}.$$

2.32. Căderea de tensiune pe linie. Să considerăm o linie bifilară, cu rezistența R (fig. 2.36), prin care este alimentat un receptor R_1 de către un generator G , care are tensiunea la borne U . Prin linie circulă un curent I și se dezvoltă o cantitate de căldură care se risipește în atmosferă. De asemenea se produce pe linie o cădere de tensiune $\Delta U = U - U_1 = RI$. La bornele receptorului R_1 ajunge tensiunea $U_1 = U - \Delta U = U - RI$. Puterea utilă, cedată receptorului, va fi $P_u = U_1I$, iar puterea totală, cedată de generator liniei și receptorului, va fi $P = UI$. Randamentul de transmisie a energiei prin această linie va fi:

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{U_1I}{UI} = \frac{U - RI}{U} = 1 - \frac{RI}{U}. \quad (6)$$

Pentru ca acest randament să fie cît mai mare trebuie ca fracția $\frac{RI}{U}$ să fie cît mai mică. Pentru o anumită putere electrică $P = UI$ de transportat pe o linie, transportul de energie este cu atît mai economic cu cît tensiunea U va fi mai mare și cu cît intensitatea I va fi mai mică.

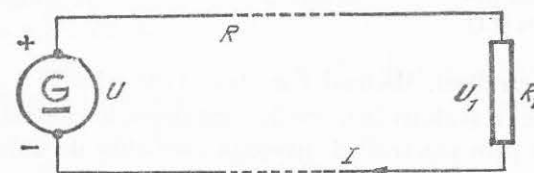


Fig. 2.36

* Transformată în mod ireversibil în energie internă și transmisă mediului înconjurător sub formă de căldură.

ÎNTREBĂRI, EXERCITII, PROBLEME

1. La rețeaua de 220 V se leagă în paralel un reșou de 500 W și o pernă de încălzit de 60 W. Care este intensitatea ce circulă prin conducta principală? Ce rezistență au reșoul și pernă?

Răspuns: 2,55 A; 96,8 Ω; 806 Ω.

2. Un electromotor conectat la o rețea cu tensiunea de 220 V consumă un curent de 8 A. Dacă randamentul electromotorului este de 85%, care sînt puterea utilă și puterea totală a electromotorului?

Răspuns: 1,49 kW; 1,76 kW.

3. Pentru confecționarea rezistenței unei plite electrice cu o putere de 600 W, care să funcționeze la 120 V, se folosește sîrmă de crom-nichel cu diametrul de 0,75 mm. Ce lungime trebuie să aibă sîrma?

Răspuns: $\approx 9,6$ m.

4. Ce rezistență are un aparat electric, dacă volimetrul conectat la bornele lui indică 120 V, iar contorul a înregistrat în 30 minute un consum de energie de 0,3 kWh?

Răspuns: 24 Ω.

5. Pentru răcirea unui reostat curge în jurul lui un curent de ulei, care se încălzește cu 50°. Ce volum de ulei curge pe secundă, știind că reostatul consumă 10 kW, iar uleiul are densitatea de 900 kg/m³ și căldura specifică $1674 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{grd}}$?

Răspuns: $133 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

6. Ce randament are un fierbător în care se încălzește un litru de apă de la 18,2°C la 80°C în 10 minute, dacă circulă prin el 2,5 A, cînd este conectat la 220 V?

Răspuns: 78,37%.

7. Un bec de 110 V și puterea de 100 W este alimentat la 220 V. Se cer:

- Rezistența ce trebuie pusă în serie cu becul, ca acesta să lumineze normal.
- Se intercalează în circuit un miliampermetru ca o rezistență interioară de 0,9 Ω care are 100 diviziuni pe scală și măsoară 1 mA/1 div, ce valoare trebuie să aibă șuntul său, ca să poată măsura 1 A?

(Concurs de admitere la Facultatea de fizică, 1965, București).

Răspuns: 121 Ω; 0,1 Ω.

8. Un generator produce într-un timp dat o cantitate de căldură într-o rezistență de 9 Ω. Ce rezistență interioară are generatorul dacă produce aceeași cantitate de căldură în același timp, într-o rezistență de 16 Ω?

(Concurs de admitere la Institutul de construcții, București, 1963.)

Răspuns: 12 Ω.

F. LEGILE ELECTROLIZEI

2.33. **Legea electrolizei.** Michael Faraday (1791—1867) a descoperit (1834) legile electrolizei. El a stabilit factorii de care depinde cantitatea de substanță depusă la electrod prin electroliză. Această cantitate de substanță depusă la electrozi va depinde, în primul rînd, de curentul electric care produce electroliza și apoi de natura electrolitului.

a. *Influența curentului electric.* Se poate demonstra prima lege a electrolizei cu ajutorul unei experiențe.

Într-un electrolizor (fig. 2.37) se pune o soluție electrolitică, de exemplu, soluție de azotat de argint (AgNO_3). Se cîntărește catodul și se lasă apoi să circule curentul electric. După un interval de timp t se intrerupe circuitul, după ce s-a citit intensitatea I a curentului electric la ampermetru. Prin cîntărirea din nou a catodului se constată că masa lui a crescut cu o cantitate m , care reprezintă masa de argint depusă la catod prin electroliză. Dacă se repetă experiența lăsînd să treacă curentul în același interval de timp, dar cu o intensitate dublă de curent, se constată că la catod se depune o masă dublă de metal. Prin urmare, masa de metal depusă la catod este proporțională cu intensitatea curentului:

$$m \sim I.$$

Se repetă experiența menținînd aceeași intensitate a curentului electric, dar lăsînd curentul să circule în intervale de timp diferite: t , $2t$, $3t$, ... Se constată că la catod se depun mase de metal proporționale cu timpul:

$$m \sim t.$$

Din aceste experiențe se poate deduce că: *masa de substanță depusă la unul dintre electrozi este proporțională cu intensitatea curentului electric și cu timpul cît circulă curentul electric prin electrolit.*

Această lege se poate exprima cantitativ în forma următoare:

$$m = kIt, \quad (1)$$

unde k este un factor de proporționalitate. Deoarece produsul $It = q$ reprezintă cantitatea de electricitate q transportată de ioni în timpul electrolizei, legea se mai poate scrie:

$$m = kq. \quad (1')$$

Factorul de proporționalitate k este o mărime care depinde de natura substanței depuse prin electroliză la catod.

Dacă prin electrolizor trece curentul electric de 1 A în timp de o secundă, scoțînd pe k din relația (1), obținem:

$$k = \frac{m}{It} = m \text{ exprimată în } \frac{\text{g}}{\text{A} \cdot \text{s}} \text{ sau } \frac{\text{g}}{\text{C}}.$$

Factorul k reprezintă masa de substanță depusă electrolitic de către un curent de un amper care circulă timp de o secundă, adică masa depusă prin trecerea unui coulomb prin electrolit. El se numește *echivalent electrochimic* al substanței

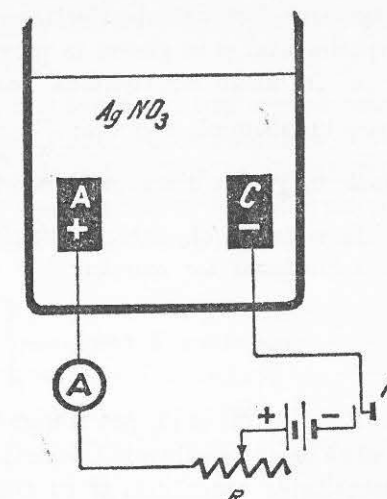


Fig. 2.37

respective. Echivalenții electrochimici ai diferitelor elemente sînt determinați experimental și se găsesc în tabele de constante fizice.

b. *Influența electrolitului.* Însemnind cu n valența elementului și cu A masa lui atomică, raportul $\frac{A}{n}$ este numeric egal cu echivalentul chimic. Masa în grame dintr-un element egală cu $\frac{A}{n}$ se numește *echivalent-gram*.

Se constată că: *echivalenții electrochimici k ai elementelor sînt proporționali cu echivalenții lor chimici:*

$$k = C \frac{A}{n} \quad (2)$$

Relațiile (1) și (2) pot fi înglobate într-o singură expresie matematică arătînd că masa de substanță depusă este proporțională cu echivalentul chimic, cu intensitatea curentului și cu timpul:

$$m = C \frac{A}{n} \cdot It \quad (3)$$

În locul constantei de proporționalitate C se utilizează inversul lui, $C = \frac{1}{F}$. Cu această notație, relația precedentă se scrie:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} It, \quad (3')$$

unde F se numește *constanta lui Faraday*. Relația (3') exprimă legea electrolizei.

În tabela următoare sînt dați echivalenții chimici și electrochimici ai citorva substanțe.

Substanța	A	n	Echivalent chimic $\frac{A}{n}$	Echivalent electrochimic k , în $\frac{mg}{C}$
Hidrogen	1,008	1	1,008	0,010363
Argint	107,9	1	107,9	1,118
Clor	35,46	1	35,46	0,367
Oxigen	16	2	8	0,0829
Cupru	63,3	2	31,65	0,320
Nichel	58,69	2	29,345	0,3041
Aluminiu	26,97	3	8,99	0,094

2.34. *Constanta lui Faraday.* Semnificația fizică a constantei lui Faraday poate fi dedusă din (3'):

$$q = It = \frac{mnF}{A}; \text{ dacă } m = \frac{A}{n} \text{ atunci } q = F.$$

Deci constanta lui Faraday (F) este numeric egală cu cantitatea de electricitate care depune electrolitic un echivalent gram din orice element chimic.

Determinările experimentale au dat pentru constanta lui Faraday valoarea:

$$F \approx 96500 \frac{\text{coulombi}}{\text{echivalent}}$$

2.35. *Structura corpusculară a electricității. Electronul.* Din legea electrolizei s-a putut deduce că sarcina electrică are structură corpusculară, adică orice sarcină electrică este formată din particule indivizibile de electricitate. Particula indivizibilă de electricitate negativă a primit mai tîrziu (1890) numele de *electron*. Iată una din căile prin care s-a ajuns la măsurarea sarcinii electrice a electronului pe baza legii lui Faraday.

Se constată din formula (3') că:

1 atom-gram de orice ioni monovalenți transportă F coulombi;

1 atom-gram de orice ioni bivalenți transportă $2F$ coulombi;

1 atom-gram de orice ioni trivalenți transportă $3F$ coulombi.

Dar din legea lui Avogadro se știe că un atom-gram din orice element conține totdeauna același număr $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ de particule. Prin urmare, un atom-gram dintr-un element monovalent conține N ioni monovalenți, iar sarcina unui singur ion monovalent va fi:

$$q_1 = e = \frac{F}{N} = \frac{96500}{6,023 \cdot 10^{23}}$$

adică:

$$e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ coulombi.}$$

În mod asemănător se deduce că sarcina unui ion bivalent va fi:

$$q_2 = \frac{2F}{N} = 2e,$$

iar a unui ion, care are valența n , va fi de n ori mai mare decît sarcina e a unui ion monovalent:

$$q_n = \frac{nF}{N} = ne.$$

Prin urmare, ionii pot avea numai sarcini egale cu $e, 2e, \dots ne$, adică mulțipli întregi de e . Nici un ion nu poate avea o sarcină care să fie un multiplu fracționar al sarcinii e a ionului monovalent. *Sarcina oricărui ion este un multiplu întreg al sarcinii elementare e* , care reprezintă cea mai mică sarcină de electricitate cunoscută.

Așadar, structura corpusculară a electricității se reflectă în faptul că legea a doua a electrolizei este o lege de numere întregi a sarcinii electrice. Dar, ori de cîte ori o mărime fizică variază prin mulțipli de numere întregi, înseamnă că acea mărime fizică este alcătuită din particule indivizibile. De aceea, Helmholtz (1881) a ajuns la concluzia că „dacă admitem existența atomilor, nu putem să evităm consecința care decurge de aici, și anume, că și electricitatea, atît cea pozitivă cît și cea negativă, este împărțită în anumite cantități elementare, care se comportă ca atomi de electricitate“.

Valoarea exactă a sarcinii electronului, dată mai sus, a fost determinată prin altă metodă de R.A. Millikan (1868—1953), în 1913.

3. ELECTROMAGNETISM

A. CÂMPUL MAGNETIC CONSTANT ȘI ACȚIUNI ALE LUI

3.1. Cîmpul magnetic și structura lui. Experiența lui Hans Christian Ørsted (1777—1851), efectuată în 1820, a arătat că în jurul oricărui conductor parcurs de curent electric apare un *cîmp magnetic*. Fizicianul român Nicolae Vasilescu-Karpen (1870—1964) a demonstrat experimental (1904) că și corpurile macroscopice electrizate, aflate în mișcare, generează cîmp magnetic în jurul lor. Existența acestui cîmp se dovedește prin forța cu care acționează asupra unui ac magnetic, pe care-l orientează, sau prin forța cu care acționează asupra unui conductor mobil, parcurs de curent electric. Cîmpul magnetic posedă energie și exercită acțiuni, este deci un sistem fizic. *Cîmpul magnetic este o formă fizică a materiei, care se manifestă prin forțe aplicate unui ac magnetic sau conductoarelor parcurse de curent electric.* Studiul proprietăților magnetice ale curentului electric se numește *electromagnetism*.

Nicolae Vasilescu-Karpen (1870—1964). Fizician român. A dovedit producerea cîmpului magnetic de către corpurile electrizate în mișcare (1904). A expus fenomenele electromagnetice (1905) fără a mai folosi noțiunea de masă magnetică. A propus cel dintâi folosirea curenților de înaltă frecvență la telefonie la mare distanță. A emis ipoteza existenței electronilor liberi în lichide.

Orientarea acelor magnetice în cîmpul magnetic se face de-a lungul unor linii, care pot fi făcute vizibile cu ajutorul piliturii de fier. Aceste linii, de-a lungul cărora se așază pilitura de fier, se numesc *linii de cîmp magnetic*. Figura formată de liniile de cîmp magnetic se numește *spectru magnetic*. Liniile de cîmp magnetic sînt curbe închise în jurul curentului care le-a generat. Forma liniilor de cîmp arată *structura cîmpului magnetic*. Pentru un curent liniar ele sînt cercuri concentrice (fig. 3.1, a). Cîmpul magnetic care are *liniile de forță paralele și echidistante* (fig. 3.2) se numește *cîmp uniform*. Cu ajutorul unor mici ac magnetice se constată că liniile de cîmp sînt tangente în fiecare punct la direcția luată de acul magnetic (fig. 3.1, b). Liniile cîmpului magnetic sînt orientate: au nu numai *direcție*, ci și *sens*.

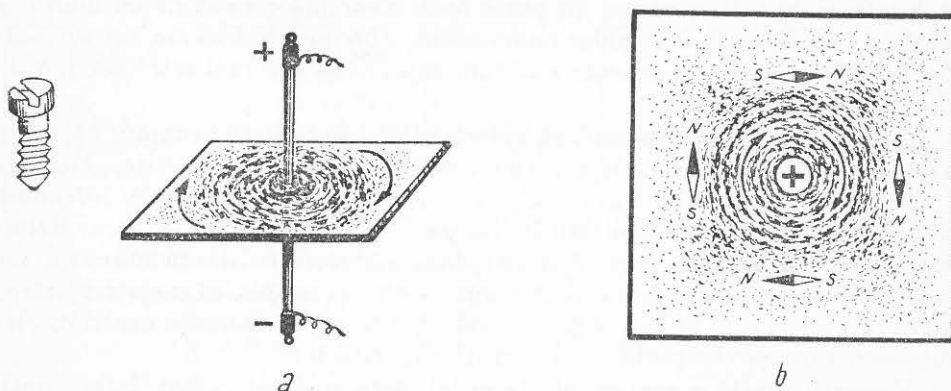


Fig. 3.1

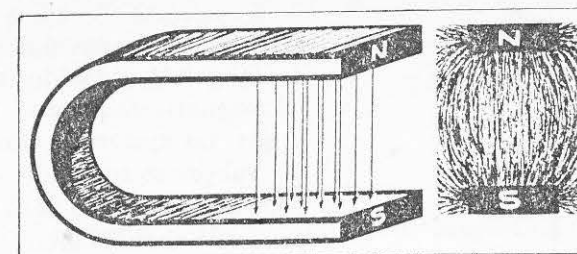


Fig. 3.2

Sensul liniilor de cîmp depinde de sensul curentului generator de cîmp și se determină cu regula burghiului. Se așază un burghiu paralel cu direcția curentului electric (fig. 3.1, a): *sensul în care trebuie rotit burghiul pentru a se deplasa în sensul curentului electric este sensul liniilor de cîmp magnetic*. În figura 3.1, b, curentul este perpendicular pe fața hîrtiei, avînd sensul dinspre noi înspre fața hîrtiei (notat cu semnul $\oplus$); în acest caz liniile de cîmp magnetic au sensul orar.

3.2. Produs vectorial. Operațiunea numită produs vectorial a doi vectori $\vec{a}$ și $\vec{b}$ are ca rezultat un al treilea vector $\vec{c}$: $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$. Vectorul produs vectorial $\vec{c}$ are următoarele elemente (fig. 3.3): *punctul de aplicație* în originea unuia din factori: *direcția* perpendiculară pe planul format de direcțiile vectorilor factori: *sensul* vectorului $\vec{c}$ e dat de regula burghiului. *E sensul în care se deplasează un burghiu* (așezat paralel cu $\vec{c}$) *dacă e rotit în sensul aducerii primului vector peste al doilea, printr-o rotație minimă* (de unghiul $\alpha < \pi$, unde α este unghiul dintre $\vec{a}$ și $\vec{b}$). Modulul c este dat de următoarea regulă de calcul: $c = ab \cdot \sin \alpha$. Dacă $\alpha = \frac{\pi}{2}$, vectorii sînt perpendiculari, iar produsul lor vectorial este maxim $c = ab \sin \frac{\pi}{2} = ab$.

Dacă $\alpha = 0$, vectorii sînt paraleli, iar produsul lor vectorial este nul $c = ab \sin 0 = 0$.

3.3. Forța electromagnetică. Acțiunea cîmpului magnetic asupra unui conductor parcurs de curent electric poartă numele de *forță electromagnetică*. Ea rezultă din interacțiunea produsă între cîmpul magnetic exterior și curentul electric din conductor.

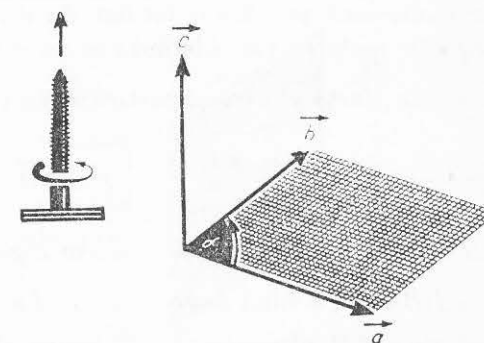


Fig. 3.3

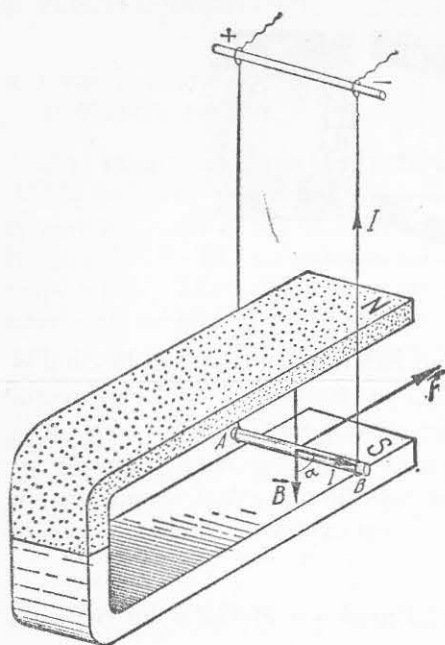


Fig. 3.4

Experiență. Se așază pe masă un magnet permanent puternic, în formă de U (fig. 3.4), așa fel încât liniile cîmpului magnetic uniform să fie îndreptate în jos. Cu ajutorul a două fire de sîrmă subțire se suspendă orizontal, între polii magnetului, o bară de aluminiu, prin care circulă curent electric I de la A la B. În cîmpul magnetic uniform se află o porțiune $AB = l$ din conductorul de aluminiu, perpendiculară pe liniile cîmpului magnetic uniform. Conductorul este deviat spre exterior cu o forță $\vec{F}$. Inversînd sensul curentului electric, se inversează și sensul forței electromagnetice $\vec{F}$. Întorcînd magnetul cu polul S deasupra, se inversează de asemenea sensul forței electromagnetice. Deci *sensul forței electromagnetice depinde atît de sensul curentului, cît și de sensul liniilor cîmpului magnetic.*

Dacă curentul devine mai intens, forța electromagnetică devine tot de atîtea ori mai mare. Experiențele dovedesc că forța electromagnetică este proporțională cu intensitatea curentului electric I și cu lungimea porțiunii de conductor l aflată în cîmpul magnetic: $F \sim Il$.

Pentru același I și același l , dar alt magnet, forța $\vec{F}$ are altă valoare. Forța electromagnetică este proporțională cu I , l și cu un factor care caracterizează acțiunea cîmpului magnetic. Se poate deci scrie:

$$F = BIl. \quad (1)$$

Mărimea B este numită *inducție magnetică*. Forța electromagnetică este perpendiculară pe planul format de direcția curentului cu liniile cîmpului magnetic uniform. Considerînd l ca un vector cu sensul lui I și B de asemenea un vector, forța electromagnetică $\vec{F}$ se exprimă prin produsul vectorial:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}). \quad (1')$$

Din această relație rezultă conform regulii de calcul a produsului vectorial: $F = IlB \sin \alpha$, α fiind unghiul dintre $\vec{l}$ și $\vec{B}$. Se observă că forța este maximă cînd $\sin \alpha = 1$ sau $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Valoarea maximă a forței electromagnetice se

obține deci cînd $\vec{l}$ este perpendicular pe $\vec{B}$. Sensul ei se află ca sensul oricărui vector produs vectorial.

Din (1) se poate deduce că:

$$B = \frac{F}{I \cdot l}, \quad (1'')$$

relație cu ajutorul căreia se poate defini inducția magnetică $\vec{B}$. Pentru aceasta se face $I = 1$, $l = 1$ și atunci $B = F$, adică: *inducția unui cîmp magnetic uniform este o mărime vectorială numeric egală cu forța cu care cîmpul magnetic acționează asupra unui conductor lung de o unitate, prin care trece un curent de o unitate, cînd e așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic.* Inducția magnetică $\vec{B}$ este un vector tangent la linia de cîmp magnetic.

3.4. Flux de inducție magnetică. Pentru a studia configurația spațială a cîmpului magnetic s-a ales o mărime fizică numită flux magnetic, care face legătura între geometria suprafețelor intersectate de liniile cîmpului magnetic și inducția cîmpului. Suprafața intersectată de liniile cîmpului are fețele deosebite: prin una intră liniile (fața negativă), prin cealaltă ies (fața pozitivă). O astfel de suprafață este orientată, deoarece se poate lega semnul feței de sensul de parcurs al conturului ei prin regula burghiului. Așezat perpendicular pe suprafața S , burghiul se deplasează în sensul pozitiv al normalei $\vec{n}$ (versor — vector unitate) dacă este rotit în sensul de parcurs al conturului suprafeței (fig. 3.5). O suprafață orientată de arie S poate fi reprezentată printr-un vector $\vec{S}$ care are: *originea* într-un punct al suprafeței, *orientarea* vectorului unitate normal $\vec{n}$, iar *modulul* egal, în unități liniare, cu valoarea numerică a ariei S , deci $\vec{S} = S\vec{n}$. În aceste condiții fluxul de inducție magnetică (fluxul magnetic) pentru o suprafață S este o mărime Φ egală cu produsul scalar dintre vectorul $\vec{B}$ și vectorul $\vec{S}$

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (2)$$

sau

$$\Phi = B \cdot S \cos \alpha = B_n S.$$

Unitatea de flux magnetic în SI va fi definită pe baza unui fenomen ce va fi studiat mai târziu. Ea se numește weber (simbol Wb).

Cu ajutorul fluxului de inducție se poate defini inducția magnetică și pe altă cale, pornind de la formula:

$$B_n = \frac{\Phi}{S}, \quad (3)$$

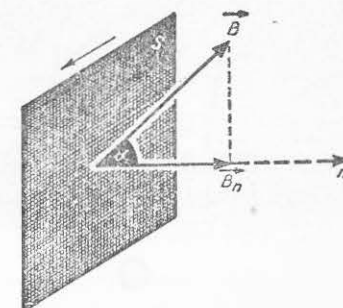


Fig. 3.5

în care se face $S = 1$ și atunci $B_n = \Phi$. Așadar, inducția magnetică a unui câmp magnetic uniform este o mărime vectorială numeric egală cu fluxul de inducție uniform, produs printr-o unitate de suprafață, așezată perpendicular pe liniile câmpului. Cu ajutorul unității de flux magnetic, weberul, se poate defini unitatea de inducție magnetică: $\langle B \rangle_{SI} = \frac{Wb}{m^2}$ care a primit numele de tesla (simbol T). Tesla este inducția unui câmp magnetic uniform, care produce un flux de 1 Wb printr-o suprafață de 1 m², așezată perpendicular pe liniile de câmp.

3.5. Inducția magnetică a câmpului din interiorul unui solenoid parcurs de curent electric. Prin solenoid se înțelege un sistem de curenți circulari, paraleli, de același sens, așezați echidistant cu centrele pe o axă mult mai lungă decât diametrul spirelor. În practică se realizează solenoidul cu un fir de sîrmă izolată, înfășurată elicoidal, sub formă de spire alăturate, pe un cilindru, cu lungime mare față de diametrul spirelor. Solenoidul se mai numește și bobină.

Cu ajutorul piliturii de fier se pune în evidență structura câmpului magnetic al solenoidului (fig. 3.6, a). În exterior câmpul magnetic al solenoidului este la fel cu cel al unei bare magnetice. Dealtfel și alte proprietăți magnetice ale solenoidului sînt la fel cu ale barei magnetice. În interior, câmpul magnetic este uniform, inducția lui magnetică are aceeași valoare în orice punct. Capătul solenoidului prin care ies liniile de câmp se numește *pol nord*, iar cel prin care intră se numește *pol sud* al solenoidului (fig. 3.6, b). *Sensul liniilor câmpului magnetic se determină aplicînd regula burghiului drept: este sensul în care se deplasează burghiul, așezat paralel cu axa solenoidului, cînd este rotit în sensul curentului electric.*

Experiență. Un ac magnetic M de 2–3 cm lungime este înfipt perpendicular pe mijlocul unei baghete din lemn subțire și foarte ușoară, cam de circa 25 cm lungime (fig. 3.7). Bagheta 1 este suspendată prin două fire de ață, de platanele unei balanțe echilibrată așa ca bagheta să fie orizontală. Ea este introdusă printr-o bobină de 250–500 spire 2, de-a lungul axului ei. Bobina este conectată în circuitul unei surse de circa 10 V, în serie cu un reostat cu

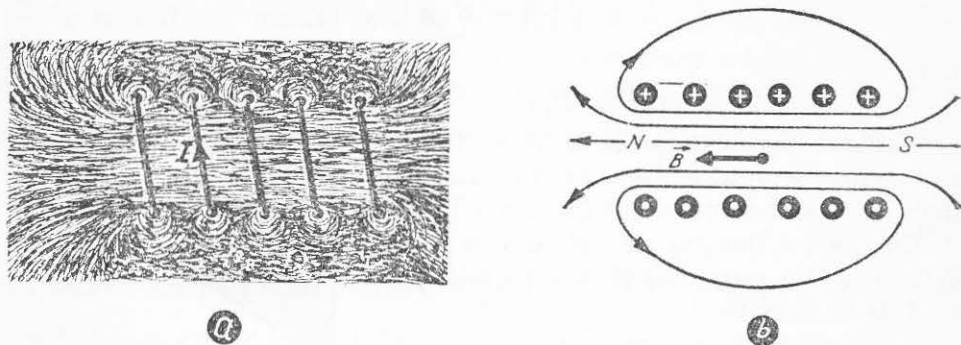


Fig. 3.6

cursor R , un ampermetru A și un întrerupător K . Se închide circuitul și se reglează intensitatea la o valoare I (circa 50 mA). Câmpul produs în bobină deviază acul magnetic, iar balanța se dezechilibrează. Se adaugă etaloane de masă pe platanul ridicat pînă ce balanța este readusă la echilibru. Valoarea greutății corpurilor cu masa marcată este o măsură a forței electromagnetice, deci a lui B . Repetind experiența pentru curenți de $2I$, $3I$ etc. se constată că valorile lui B devin $2B$, $3B$ etc. Așadar: pentru aceeași bobină, în aceleași condiții inducția magnetică variază proporțional cu intensitatea curentului care circulă prin spire: $B \sim I$.

Se repetă experiența, cu același curent, folosind o bobină la fel de lungă, dar cu număr de spire pe jumătate sau dublu. Se constată că inducția magnetică variază proporțional cu numărul N de spire, pentru același curent și aceeași lungime a bobinei: $B \sim N$.

Mentîinînd același curent I și același număr de spire N se repetă experiența cu o bobină de 500 spire, apoi cu două de aceeași lungime de cîte 250 spire, legate în serie și alăturate: lungimea solenoidului se dublează. Se constată că pentru același N și același I , inducția magnetică variază invers proporțional cu lungimea bobinei: $B \sim \frac{1}{l}$.

Rezultatele acestor experiențe se pot strînge într-o singură concluzie: inducția magnetică într-un punct din interiorul unui solenoid (bobină) este proporțională cu numărul de spire, cu intensitatea curentului și este invers proporțională cu lungimea solenoidului:

$$B = \mu \frac{NI}{l}. \quad (4)$$

Factorul de proporționalitate μ depinde de natura mediului în care se produce inducția magnetică.

3.6. Permeabilitatea magnetică. Din relația (4) se constată că inducția magnetică B depinde de intensitatea curentului și forma circuitului $\left(\frac{NI}{l}\right)$, precum și de proprietățile magnetice ale mediului în care se creează câmpul magnetic. Proprietățile magnetice ale unui mediu sînt caracterizate de o mărime μ numită permeabilitate magnetică a mediului. Dacă solenoidul este în vid, inducția magnetică va fi: $B_0 = \mu_0 \left(\frac{NI}{l}\right)$, notînd cu μ_0 permeabilitatea magnetică a vidului.

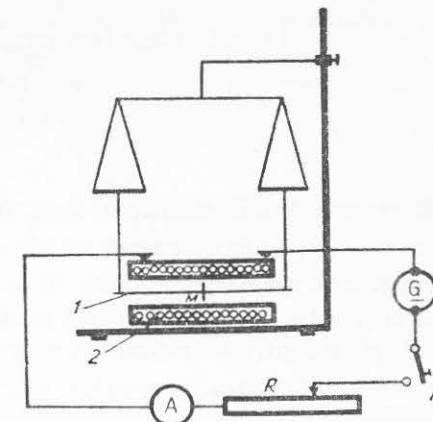


Fig. 3.7

Se deduce:

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r$$

Raportul:

$$\boxed{\frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r} \quad (5)$$

se numește *permeabilitate relativă* μ_r a mediului: ea reprezintă raportul dintre permeabilitatea mediului și permeabilitatea vidului. Este o *constantă de material*, și evident, nu are unități de măsură.

Permeabilitatea magnetică relativă μ_r a unui material se măsoară prin raportul dintre modulul inducției magnetice $\vec{B}$ produsă într-un solenoid cu miez din acel material și modulul inducției magnetice $\vec{B}_0$ produsă în vid, de același solenoid, parcurs de același curent.

Unitatea de permeabilitate magnetică se poate deduce din (4):

$$\langle \mu \rangle_{SI} = \frac{\langle B \rangle \langle l \rangle}{\langle N \rangle \langle I \rangle} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} \cdot \frac{1}{\text{m}},$$

deoarece N (numărul de spire) nu are unitate de măsură.

Unitatea $\frac{\text{Wb}}{\text{A}}$ a primit numele de henry (simbol H). De aceea unitatea de permeabilitate este:

$$\langle \mu \rangle_{SI} = \frac{\text{H}}{\text{m}}. \quad (6)$$

3.7. Intensitatea cîmpului magnetic. Inducția magnetică produsă într-un punct de un curent electric depinde de *natura mediului*, reprezentată prin μ , dar și de *forma circuitului* și *intensitatea curentului*, reprezentate prin expresia $\frac{NI}{l}$. Expresia $H = \frac{NI}{l}$ se numește *intensitatea cîmpului magnetic* și poate să caracterizeze, de asemenea, cîmpul magnetic într-un punct, dar independent de mediul în care este generat cîmpul magnetic. Intensitatea cîmpului magnetic $\vec{H}$ este o mărime vectorială ca și $\vec{B}$, din același punct al cîmpului. Acești doi vectori sînt coliniari, de același sens, iar între ei există relația

$$\boxed{\vec{B} = \mu \vec{H}}, \quad (7)$$

dedusă din (4). În timp ce B este dedus din forțele exercitate de cîmpul magnetic, H este calculat din valoarea curentului și forma circuitului prin formula de mai sus $H = \frac{NI}{l}$. Intensitatea cîmpului magnetic dintr-un punct din interiorul solenoidului va fi deci: $H = \frac{B}{\mu} = \frac{NI}{l}$.

Unitatea de intensitate a cîmpului magnetic se deduce astfel:

$$\langle H \rangle_{SI} = \frac{\langle N \rangle \langle I \rangle}{l} = \frac{\text{A}}{\text{m}},$$

și se numește *amper pe metru*.

3.8. Cîmpul magnetic generat în jurul unui conductor liniar parcurs de curent. Liniile de cîmp sînt cercuri concentrice pe curent. Acul magnetic arată sensul acestor linii (fig. 3.1, b), dat de regula burghiului (fig. 3.8, b). Experiența a dovedit că intensitatea cîmpului magnetic într-un punct A este dată de relația:

$$\boxed{H = \frac{I}{2\pi r}}, \quad (8)$$

numită *legea Biot-Savart*. Inducția magnetică B în același punct va fi:

$$\boxed{B = \frac{\mu I}{2\pi r}},$$

unde r este distanța de la punct la conductorul liniar parcurs de curentul electric (fig. 3.8, a).

3.9. Cîmpul magnetic generat în jurul unui conductor circular parcurs de curent electric. Pe un carton orizontal, care este străbătut de o spiră în două puncte (fig. 3.9), se presară pilitură de fier. Liniile de cîmp ale cîmpului magnetic generat sînt *curbe închise*, care înconjură curentul; la rîndul său, spira înconjură liniile cîmpului. Ele sînt ca două zale ale unui lanț: spunem că sînt

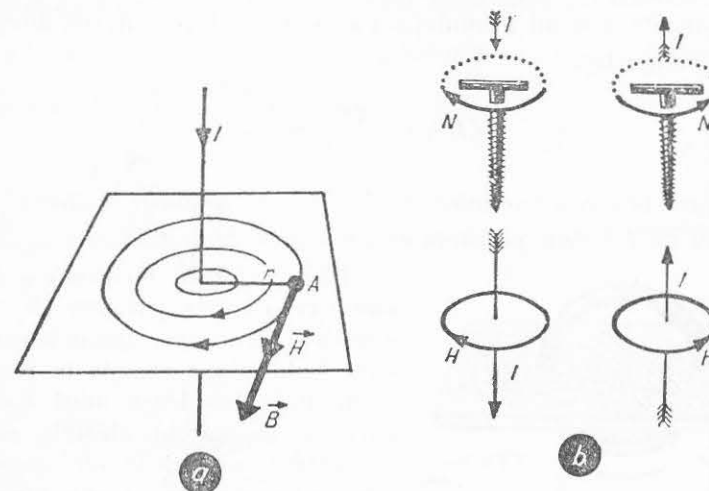


Fig. 3.8

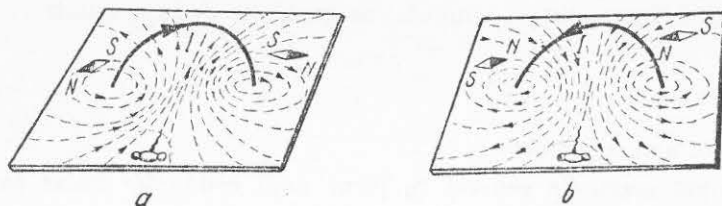


Fig. 3.9

înlănțuite. Liniile de cîmp ies printr-o față a spirei — fața *nord* — și intră prin cealaltă — fața *sud*. Cu alte cuvinte o spirală parcursă de curent electric este asemenea unui magnet plat, numit *foiță magnetică*. În centrul spirei cîmpul magnetic are intensitatea:

$$H = \frac{I}{2r} \quad (9)$$

Inducția magnetică va fi orientată în sensul vectorului unitate normal la suprafața spirei parcursă în sensul curentului electric:

$$B = \frac{\mu I}{2r} \quad (10)$$

cu aceeași orientare ca $\vec{H}$.

Un cadru format din N spire alăturate (fig. 3.10) parcurse de curentul I produce în centrul său un cîmp magnetic de N ori mai intens decît în cazul unei singure spire parcurse de același curent. De aceea, cadrul se mai numește multiplicator. Pe temeiul formulei (9) se poate defini unitatea de intensitate a cîmpului magnetic:

$$\langle H \rangle_{SI} = \frac{\langle I \rangle}{\langle r \rangle} = \frac{A}{m}.$$

Așadar: *amper pe metru este intensitatea cîmpului magnetic în centrul unei spire cu diametrul de 1 metru, parcursă de un curent de 1 A.*

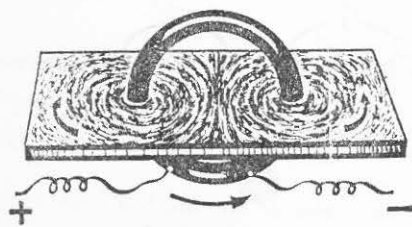


Fig. 3.10

3.10. Acțiunea reciprocă a două conductoare paralele, parcurse de un curent electric. Orice conductor prin care circulă curent electric se găsește în propriul său cîmp magnetic. Dacă două conductoare parcurse de curent electric se află în vecinătate, cîmpurile lor magnetice se vor suprapune, se vor compune, și între conductoare se vor exercita forțe electrice

de atracție ori de respingere, numite forțe electrodinamice. Aceste forțe au fost studiate de André Marie Ampère.

Experiență. Cadrul C_1 , suspendat prin contactele mobile A_1 și A_2 de un stativ (fig. 3.11), este parcurs de curentul I_1 , care intră prin borna B_1 și iese prin B_2 . Al doilea cadru C_2 este parcurs de curentul I_2 . Se așază cadrul C_2 așa ca prin laturile lor paralele și apropiate să circule curentul în același sens: cadrul C_1 se apropie de C_2 , deci între laturile paralele parcurse de curenți de același sens se exercită o forță de atracție. Întorcînd cadrul C_2 așa ca prin laturile considerate să circule curenții I_1 și I_2 în sens contrar, forța dintre laturile paralele este de respingere, de aceea cadrul C_1 se depărtează de C_2 .

Ampère a dedus legile acțiunilor reciproce dintre conductoarele parcurse de curent electric. *Conductoarele paralele prin care circulă curenți de același sens se atrag. Dacă sînt parcurse de curenți de sens contrar se resping. Dacă cele două conductoare prin care circulă curentul fac între ele un unghi (și sînt mobile) se rotesc pînă ajung paralele așa ca să fie parcurse de curenți în același sens.*

Valoarea forței electrodinamice se poate deduce în modul următor (fig. 3.12). Conductorul parcurs de curentul I_2 se află în cîmpul magnetic produs de I_1 , care va avea în punctul A_2 inducția $B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi r}$; r este distanța



André Marie Ampère (1775—1836). Fizician francez. A descoperit legile interacțiunii dintre curenții electrice. A elaborat prima teorie (1825) pentru explicarea magnetismului, cu ajutorul curenților moleculari. A fost unul dintre fondatorii electrodinamicii moderne.

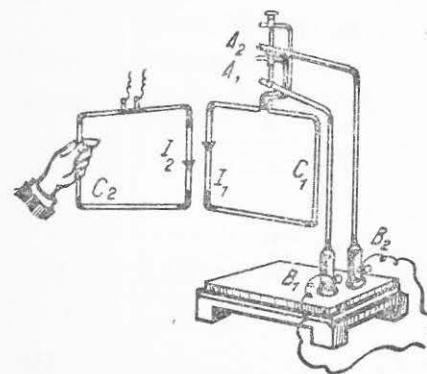


Fig. 3.11

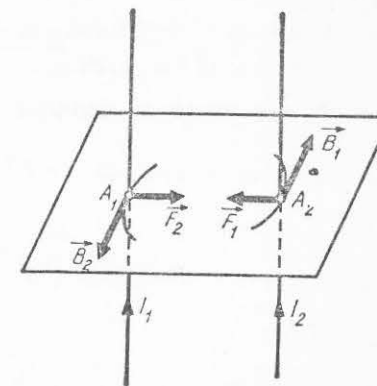


Fig. 3.12

dintre cele două conductoare. Cîmpul de inducție $\vec{B}_1$ va produce asupra lui I_2 o forță electromagnetică $\vec{F}_1$:

$$F_1 = B_1 I_2 l = \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi r},$$

pentru o porțiune de conductor de lungime l .

În mod analog, inducția $\vec{B}_2$, produsă de I_2 , în punctul A_1 , va acționa cu forța electromagnetică $\vec{F}_2$ asupra lui I_1 :

$$F_2 = B_2 I_1 \cdot l = \mu \frac{I_1 I_2 \cdot l}{2\pi r} = F_1.$$

Așadar, două conductoare paralele parcurse de curent electric interacționează cu o forță:

$$\boxed{F = \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi r}} \quad (11)$$

3.11. Etalonul pentru unitatea de intensitate a curentului electric. Amperul este unitate fundamentală, în SI. Realizarea concretă a acestei unități — etalonul ei — se face pe baza interacțiunii dintre curenții rectilinii și paraleli. Din expresia ei (11) se deduce, făcînd $I_1 = I_2 = I$, relația de definiție pentru intensitate:

$$I = \sqrt{\frac{2\pi r F}{\mu_r \mu_0 l}}.$$

Pe temeiul acestei relații s-a definit amperul:

- Amperul este intensitatea curentului electric constant care, circulînd prin două conductoare rectilinii paralele și foarte lungi, așezate în vid la 1 m unul de altul, produce între aceste conductoare o forță de $2 \cdot 10^{-7}$ newtoni pe un metru de lungime.

Din definirea amperului se poate deduce valoarea constantei magnetice μ_0 astfel:

$$\mu_0 = \frac{2\pi r F}{I^2 l} = \frac{2\pi \cdot 1\text{m} \cdot 2 \cdot 10^{-7}\text{N}}{1\text{A}^2 \cdot 1\text{m}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}.$$

Dar din ecuația (1) se deduce:

$$N = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot \text{A} \cdot \text{m},$$

deci

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Wb} \cdot \text{A} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{A}^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

și, în fine:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}. \quad (12)$$

3.12. Acțiunea cîmpului magnetic asupra particulelor electrizate aflate în mișcare. Orice particulă electrizată și în mișcare reprezintă un curent electric. Cîmpul magnetic va acționa de aceea asupra ei cu o forță care a primit numele de forță lorentziană, în cinstea fizicianului Hendrik Antoon Lorentz (1853—1928). Expresia acestei forțe se poate deduce pornind de la formula forței electromagnetice (1) care acționează asupra unui conductor de lungime l (fig. 3.13), parcurs de curentul I și aflat în cîmpul $\vec{B}$.

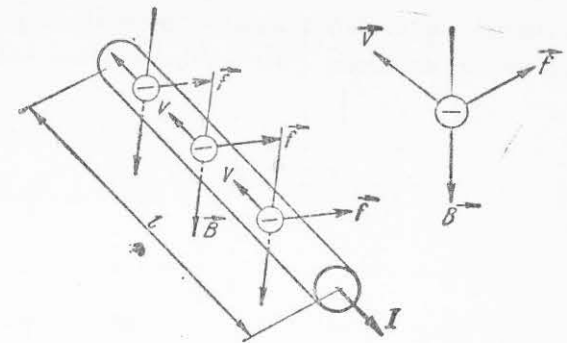


Fig. 3.13

Modulul forței lorentziene $\vec{f}$ va fi

$$f = \frac{F}{nSl} = \frac{IBl}{nSl} = \frac{IB}{nS},$$

în care n este concentrația electronilor liberi din conductor. În porțiunea de conductor l vor fi nSl electroni. Dar intensitatea curentului este sarcina electronilor care străbat secțiunea conductorului S într-o secundă $I = nSv$, unde v reprezintă viteza medie a electronilor liberi. Așadar:

$$f = \frac{nSvB}{nS} = evB.$$

O particulă încărcată cu sarcina q , mișcîndu-se cu viteza $\vec{v}$ într-un cîmp uniform de inducție $\vec{B}$, viteza $\vec{v}$ fiind perpendiculară pe liniile de cîmp, este acționată de o forță lorentziană $\vec{f}$.

$$\boxed{f = qvB.} \quad (13)$$

Direcția acestei forțe este perpendiculară pe planul format de direcția vectorului vitează cu direcția vectorului inducție magnetică, iar sensul este al vectorului $\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$. (În fig. 3.14, a, $\alpha = \frac{\pi}{2}$.) În cazul cînd viteza $\vec{v}$ face unghiul $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$ cu direcția liniilor de cîmp (fig. 3.14, b) forța lorentziană va fi:

$$f = qv_1 B = qv B \sin \alpha,$$

adică va fi tocmai produsul vectorial dintre vectorul $q\vec{v}$ și vectorul inducție magnetică $\vec{B}$:

$$\boxed{\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}.} \quad (14)$$

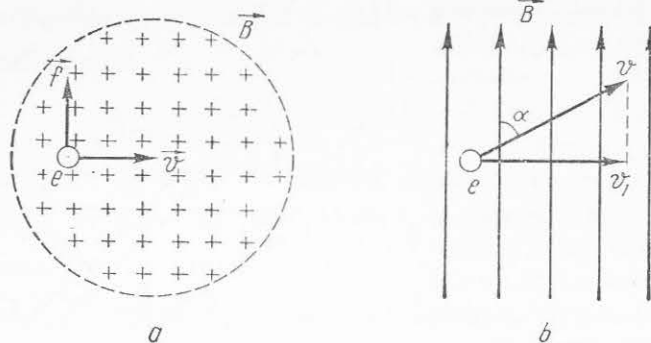


Fig. 3.14

Pe figura 3.14, b forța lorentziană $\vec{f}$ este îndreptată de la figură spre noi, adică în sensul în care s-ar deplasa un burghiu când ar fi rotit în sens antiorar (pentru a aduce vectorul $\vec{v}$ peste vectorul $\vec{B}$ pe calea cea mai scurtă) adică sensul aflat cu regula burghiului este acela dat de regula produsului vectorial.

3.13. Aplicații ale forței lorentziene. Mișcarea unei particule electrizate (ion, proton, electron etc.) într-un câmp magnetic uniform, în care intră cu viteza $\vec{v}$, perpendiculară pe direcția liniilor de câmp (fig. 3.15). Forța lorentziană $\vec{f}$ este permanent perpendiculară pe viteză și pe inducția magnetică, având sensul ca în figura 3.15, a , pentru particula încărcată pozitiv și ca în figura 3.15, b , pentru particula încărcată negativ. Forța lorentziană acționează ca o forță centripetă și, ca urmare, particula descrie o traiectorie circulară, având planul perpendicular pe liniile de câmp: $f = F_{cp} \Rightarrow qvB = \frac{mv^2}{r}$, r fiind raza traiectoriei particulei. De aici se deduce:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{Br}, \quad (15)$$

adică sarcina specifică a particulei electrizate. Este de remarcă faptul că în timp ce descrie traiectoria circulară în câmpul magnetic uniform, câmpul mag-

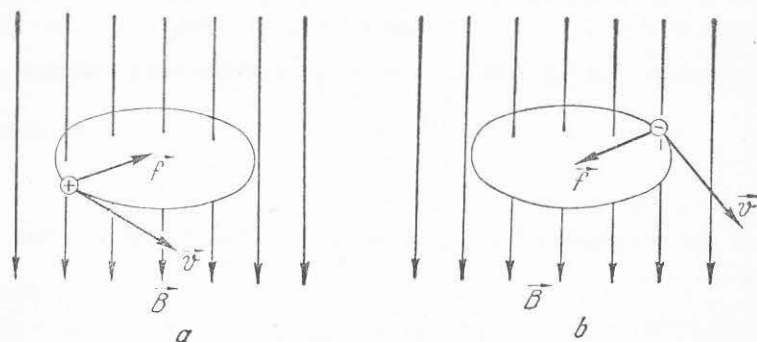


Fig. 3.15

netic nu transmite particulei energie sub formă de lucru mecanic (forța lorentziană este perpendiculară pe viteză, adică pe deplasare); particula se mișcă, păstrând constantă energia cu care a intrat în câmp.

Perioada T a particulei în această mișcare circulară va fi:

$$T = \frac{2\pi r}{v},$$

iar v se scoate din relația (15). Se obține astfel:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Valoarea perioadei depinde numai de masa și sarcina particulei și de inducția câmpului magnetic; nu depinde de raza traiectoriei.

Mișcarea particulelor în câmpul magnetic are aplicații în fizica atomică (ciclotron, determinarea sarcinii specifice etc.). Pe această cale s-a determinat sarcina specifică a electronului $\left(\frac{e}{m}\right)$, iar din aceasta, cunoscându-se sarcina electronului e , s-a determinat masa electronului.

Determinarea sarcinii specifice a electronului pentru viteze din ce în ce mai mari a făcut să se observe că această mărime scade pe măsură ce viteza crește. Întrucât sarcina este invariantă, urmează că masa electronului crește cu viteza. În felul acesta s-a demonstrat experimental variația relativistă a masei cu viteza potrivit formulei:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16)$$

dovedită de teoria relativității. În relația (16), m_0 este masa de repaus, m este masa electronului care se mișcă cu viteza de modul v , iar $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ este viteza luminii în vid.

3.13. Comparație între câmpul electrostatic și câmpul magnetic. Asemănările și deosebirile dintre aceste două câmpuri ies mai bine în evidență din următorul tabel comparativ:

	Câmpul electrostatic	Câmpul magnetic
Produs de	Prezența sarcinilor electrice în echilibru	Mișcarea sarcinilor electrice
Liniile de câmp	Încep pe sarcini pozitive și sfîrșesc pe sarcini negative	Sînt linii închise; nu există mase magnetice
Câmp uniform se obține	Între armăturile condensatorului plan	În interiorul solenoidului

	Cîmpul electrostatic	Cîmpul magnetic
Intensitatea	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	Inducția $\vec{B} = \frac{\vec{F}}{qv}$
Orientarea	$\vec{E}$ tangent la linia de cîmp și de același sens	$\vec{B}$ tangent la linia de cîmp și de același sens
Acționează asupra	sarcinilor electrice	curenților și magneților
Poziția forței față de intensitate	$\vec{F}$ și $\vec{E}$ au aceeași orientare	$\vec{F}$ este perpendiculară pe $\vec{B}$ și pe direcția conductorului
Lucrul mecanic	nu depinde de drum (cîmp potențial)	depinde de drum (cîmp solenoidal)
Substanța în cîmp este caracterizată prin	ϵ_r	μ_r

ÎNTREBĂRI, EXERCIIII, PROBLEME

1. Să se deseneze liniile cîmpului magnetic produs de conductoarele parcurse de curent din figura 3.16.
2. Să se stabilească sensul curenților care produc cîmpurile magnetice din figura 3.17.
3. Ce se întîmplă cu un flux de electroni de diferite viteze, care trec prin același cîmp magnetic, perpendicular pe liniile de cîmp?
4. O spirală metalică este suspendată de un suport (fig. 3.18), iar extremitatea ei inferioară este cufundată puțin într-un vas cu mercur. Să se explice fenomenul care se va produce dacă prin spirală circulă curent electric.
5. Există deosebire de natură fizică între forța electromagnetică și interacțiunea dintre două conductoare parcurse de curent electric?

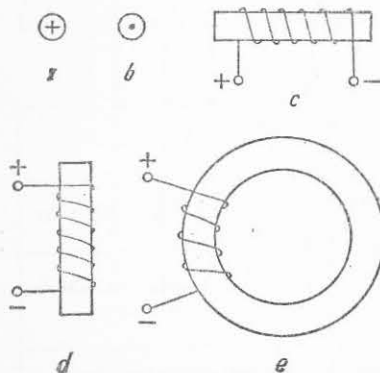


Fig. 3.16

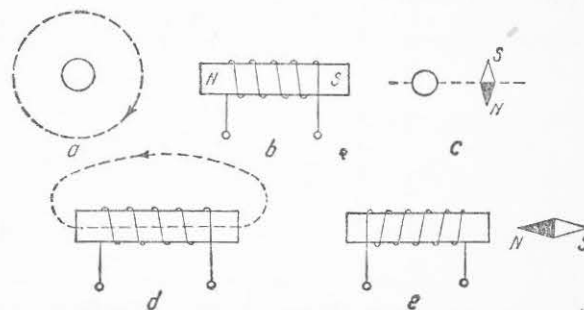


Fig. 3.17

6. Ce intensitate are cîmpul magnetic creat de un fir liniar la 10 cm depărtare de el, dacă este străbătut de 314 A?

Răspuns: $500 \frac{A}{m}$.

7. Două conducte paralele aflate la 10 cm una de alta sînt parcurse de curenți în același sens. Prima este parcursă de 125,6 A, a doua de 31,4 A. Ce intensitate are cîmpul magnetic rezultat în punctele situate la jumătatea distanței dintre cele două conducte? Dar într-un punct exterior aflat la 5 cm de curentul cel mai slab și la 15 cm de celălalt? În ce puncte intensitatea cîmpului magnetic este nulă?

Răspuns: $300 \frac{A}{m}$; $233,3 \frac{A}{m}$; 8 cm față de curentul cel mai intens.

8. Printr-un solenoid cu 600 de spire, pe o lungime de 15 cm circulă un curent de 1,5 A. Ce valoare are intensitatea cîmpului în interior?

Răspuns: $6 \cdot 10^{-3} \frac{A}{m}$.

9. O spirală circulară cu raza r s-a conectat la o tensiune electromotoare constantă. Cum se schimbă intensitatea cîmpului magnetic din centrul spirei dacă din ea se fac două spire cu raza de $\frac{r}{2}$?

Răspuns: se mărește de 4 ori.

10. Un generator este conectat la două virfuri opuse ale unui cadru pătrat de sîrmă. Care este intensitatea cîmpului magnetic produs în centrul cadrului de curenții care circulă prin laturile lui? (Indicație: se urmărește sensul cîmpului magnetic produs de curentul electric din fiecare latură a pătratului.)

Răspuns: zero.

11. Un cuptor este alimentat cu un curent electric de 2 000 A, care circulă prin două conductoare paralele așezate la 4 cm unul de altul. Ce forță se exercită între cele două conductoare, pe fiecare metru de lungime?

Răspuns: $20 \frac{N}{m}$.

12. Într-un cîmp magnetic se găsește un conductor lung de 25 cm, așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic și parcurs de 100 A. Ce forță electromagnetică acționează asupra lui dacă inducția magnetică este de 0,8 T?

Răspuns: 20 N.

13. Să se determine sensul de rotație al electromotorului din figura 3.19, a.

14. Să se determine sensul curentului electric din înfășurarea electromagnetului (fig. 3.19, b) pentru ca electromotorul să se rotească în sensul acelor unui ceasornic.

15. Două conductoare rectilinii coplanare, parcurse de curentul I fac între ele 90° . Să se determine inducția B în punctele aflate la egală distanță de fiecare conductor.

Răspuns: 0 sau $\mu_r \frac{\mu_0 I}{\pi r}$.



Fig. 3.18

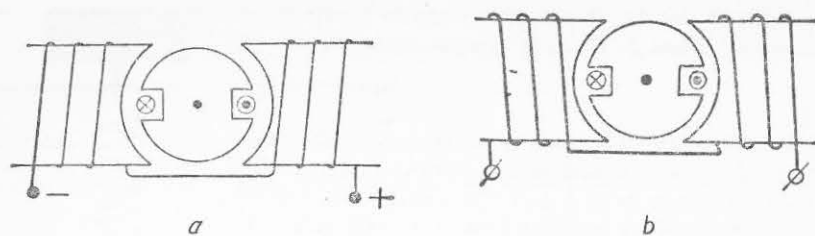


Fig. 3.19

16. Într-un câmp magnetic uniform cu $B = 1,2 \text{ T}$ se află un conductor liniar lung de 80 cm, parcurs de 80 A, așezat perpendicular pe B . Care este forța electromagnetică?

Răspuns: 76,8 N.

17. În vîrfurile ABC ale unui triunghi echilateral cu latura de 10 cm se află trei conductoare paralele. Prin B și C curenții sînt egali cu 6 000 A și de același sens. În A curentul are 12 000 A și este de sens contrar celorlalți. Se cere forța pe unitatea de lungime a fiecărui conductor.

Răspuns: $144 \sqrt{3} \frac{\text{N}}{\text{m}}$; $72 \sqrt{3} \frac{\text{N}}{\text{m}}$.

18. O bobină toroidală cu raza medie de 8 cm are 5 000 spire. Ea este parcursă de un curent de 314 mA. Se cer:

- intensitatea cîmpului magnetic în interior;
- cum se poate obține aceeași intensitate cu un curent de 10 ori mai mare?

Răspuns: $3 \cdot 125 \frac{\text{A}}{\text{m}}$; 500 de spire.

19. O particulă electricizată pozitiv intră cu viteza de $2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ perpendicular pe liniile unui câmp magnetic uniform cu inducția de 1 T și descrie un arc de cerc cu raza de 20,86 cm. Se cer:

- sarcina specifică a particulei;
- masa ei, dacă are $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
- tensiunea electrică necesară pentru a accelera particula pînă la această viteză.

Răspuns: $9,6 \cdot 10^{-17} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$; $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $2 \cdot 10^6 \text{ V}$.

20. O baterie este compusă din șase elemente galvanice legate în serie, avînd fiecare t.e.m. de 2 V și rezistența interioară de 0,15 Ω . În circuitul exterior se află o rezistență de 5 Ω , legată în serie cu un grup format dintr-o rezistență de 7 Ω în paralel cu un solenoid cu lungimea de 20 cm, avînd 300 de spire și rezistența activă de 3 Ω . Se cer:
- tensiunea la bornele bateriei în circuit deschis și în circuit închis;
 - intensitatea principală și intensitățile în cele două ramuri;
 - cantitatea de căldură dezvoltată în două minute de către rezistența legată în paralel cu bobina;
 - inducția magnetică pe axul solenoidului;
 - fluxul magnetic printr-o spirală a solenoidului și fluxul total, spira avînd diametrul de 4 cm.

(Concurs de admitere, Institutul politehnic Gh. Gheorghiu-Dej, București — 1966)

Răspuns: 12 V; 10,65 V; 1,5 A; 0,45 A; 1,05 A; 170,1 J; $1,98 \cdot 10^{-3} \text{ T}$; $7,46 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$; $2,49 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$.

B. INTERACȚIUNEA DINTRE CÎMPUL MAGNETIC ȘI SUBSTANȚĂ

3.14. **Magnetizarea substanțelor.** Prin introducerea într-un câmp magnetic exterior, substanțele se magnetizează, unele mai mult, altele mai puțin. Odată cu dispariția cîmpului magnetizant unele din ele se demagnetizează, altele însă rămîn magnetizate, devenind magneți permanenți.

Experiență. Sub o bară din fier F (fig. 3.20, *a*) introdusă într-o bobină B este așezat un carton, pe care se găsesc cuie de fier. Cînd circulă curent prin bobină, bara de fier se magnetizează și atrage cuiele. La întreruperea curentului electric, bara de fier se demagnetizează și cuiele se desprind. Repetînd experiența cu o bară din oțel, aceasta rămîne magnetizată și după încetarea curentului electric.

Fierul se magnetizează temporar, dînd naștere unui electromagnet, oțelul se magnetizează permanent.

Experiență. Un magnet în formă de bară (fig. 3.20, *b*) este suspendat în fața unei bobine, așezată coaxial cu magnetul. La trecerea curentului electric prin bobină magnetul este atras sau respins, după sensul curentului din bobină. Prin cîmpul său magnetic, bobina se comportă ca o bară magnetică. Dacă în bobină se introduce un miez de fier, magnetul suspendat este atras ori respins cu forță mai mare. Miezul din fier produce o întărire a cîmpului magnetic al bobinei, prin cîmpul magnetic produs de el însuși prin magnetizare. Așadar: *fierul și alte substanțe asemănătoare lui (nichel, cobalt, precum și diferite aliaje) se magnetizează foarte puternic atunci cînd se află în cîmpuri magnetice exterioare.* Asemenea substanțe se numesc *feromagnetice*. La cîmpul magnetic uniform $\vec{H}$, în care este așezată substanța feromagnetică (fig. 3.21, *a*), se adaugă

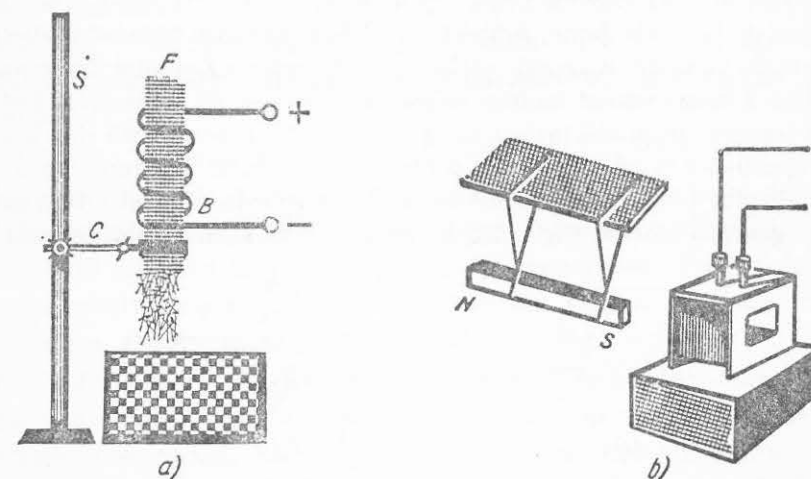


Fig. 3.20

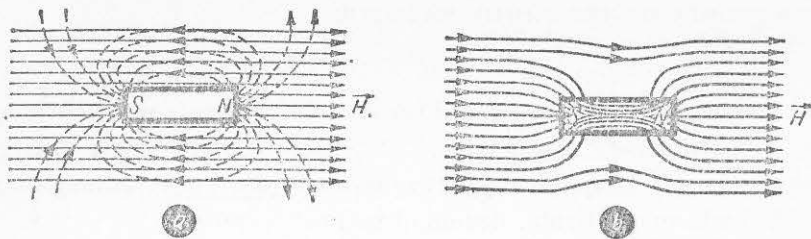


Fig. 3.21

și liniile câmpului magnetic produs de bară prin magnetizare, ceea ce are ca urmare producerea unui câmp magnetic foarte intens în interiorul barei (fig. 3.21, b). Acest câmp are inducția de modul $B = \mu_r B_0$, unde $\mu_r \gg 1$ (mult mai mare decât 1). Există aliaje feromagnetice care au permeabilitatea relativă μ_r foarte mare. De exemplu, valorile maxime ale lui μ_r ajung pentru fier la $\mu_r = 5\,000$, pentru oțel electrotehnic la 10 000, pentru oțel-cobalt la 9 000, pentru aliajul permalloy (78,5% Ni + 21,5% Fe), la 100 000, pentru aliajul supermalloy, la 900 000. *Permeabilitatea magnetică a substanțelor feromagnetice nu este constantă; ea depinde de intensitatea H a câmpului magnetizant, dar și de faptul dacă substanța a mai fost înainte într-un câmp magnetic sau nu. Se spune că substanțele feromagnetice „au memorie”, din care cauză sînt utilizate la mașinile de calcul. Așadar, deși $B = \mu H$, la substanțele feromagnetice B nu variază proporțional cu H .*

3.15. Explicarea magnetismului. Faptul că liniile de câmp magnetic sînt închise dovedește că nu există sarcini sau mase magnetice care să genereze câmpul magnetic, așa cum sarcinile electrice generează câmpul electrostatic. Câmpul magnetic este generat de curentul electric, cu care există simultan și formează aspecte diferite ale unui singur proces fizic. Pe de altă parte, prin divizarea unui magnet nu se obțin două bucăți cu câte un pol magnetic, ci doi magneti cu câte doi poli magnetici, oricît s-ar continua diviziunea magnetului.

Plecînd de la aceste fapte, Ampère, în 1825, a presupus că substanțele magnetice sînt formate din magneti moleculari, datorăți existenței unor curenți moleculari. Fiecare curent molecular produce un magnet molecular. Datorită mișcării termice, magnetii moleculari au distribuție dezordonată (fig. 3.22, a), încît câmpurile lor magnetice se compensează reciproc, iar substanța în ansamblu nu prezintă proprietăți magnetice. Dacă substanța este introdusă într-un câmp magnetic exterior (fig. 3.22, b) magnetii moleculari sînt orientați în

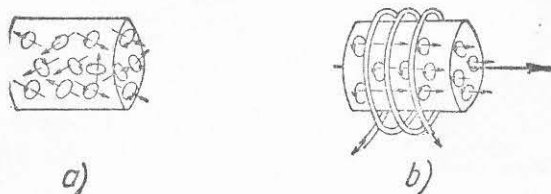


Fig. 3.22

același sens și substanța se magnetizează. Suprimînd cîmpul magnetizant, substanța se demagnetizează.

Descoperirile ulterioare ale fizicii au confirmat ipoteza magnetilor moleculari a lui Ampère. Mișcarea unui electron în jurul nucleului atomic echivalează cu un curent electric I (fig. 3.23) care produce un câmp magnetic de intensitate $\vec{H}$. Electronul mișcîndu-se în jurul nucleului atomic se comportă ca cel mai mic magnet posibil.

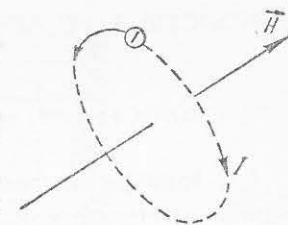


Fig. 3.23

Acest magnet elementar, produs prin rotirea unui singur electron în jurul nucleului, este caracterizat printr-o mărime numită *moment magnetic*. Prin moment magnetic al unui curent se înțelege produsul între intensitatea curentului și suprafața limitată de el. Pornind de la această definiție, valoarea momentului magnetic al unui electron (magneton) a fost calculată pentru întia oară (1912) de către prof. Ștefan Procopiu de la Universitatea din Iași. Cum în fiecare atom se rotesc mai mulți electroni, în plane diferite, suma vectorială a magnetonilor dă valoarea câmpului magnetic al atomului, adică un fel de „magnet molecular” în sensul imaginat de Ampère.

Ștefan Procopiu 1890—1972. Fizician român. A calculat cel dintîi (1912) momentul magnetic al electronului pe orbita în jurul nucleului (numit magneton Bohr). A descoperit (1921) efectul care îi poartă numele, care constă în depolarizarea longitudinală a soluțiilor coloidale și a suspensiilor cristaline. A descoperit (1929) discontinuitatea magnetizării la trecerea curentului alternativ printr-un fir feromagnetic.

Pentru explicarea completă a feromagnetismului trebuie să se țină seama și de rotația electronului în jurul axei sale proprii. Mișcarea electronului produce, de asemenea, un câmp magnetic, a cărui acțiune duce la magnetizarea substanțelor feromagnetice, printr-un complex de fenomene, care depășesc cadrul studiului nostru. De asemenea, nucleele atomice au un moment magnetic.

3.16. Para și diamagnetismul. Unele substanțe ca aluminiul, manganul, cromul, staniul, aerul, oxigenul etc., puse într-un câmp magnetic, se magnetizează în același sens cu câmpul magnetizant, ca și cele feromagnetice, dar într-o măsură mult mai mică. Se numesc substanțe *paramagnetice*. Pentru ele permeabilitatea relativă este puțin mai mare decât unu, dar are valoare constantă. De exemplu, aluminiul are $\mu_r = 1,000022$.

Alte substanțe, ca: Bi, Hg, Ag, Cu etc., puse într-un câmp magnetizant, se magnetizează foarte slab, dar în sens contrar câmpului magnetizant. Se numesc substanțe *diamagnetice*. Ele au permeabilitatea relativă constantă, dar inferioară lui unu. De exemplu, Bi are $\mu_r = 0,99983$, iar la Cu $\mu_r = 0,99999$.

4. INDUCȚIE ELECTROMAGNETICĂ

A. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE INDUSĂ ȘI LEGILE EI

4.1. Inducția electromagnetică. Michael Faraday a descoperit fenomenul de inducție electromagnetică în 1831. El a constatat că prin variația unui cîmp magnetic se poate produce curenț electric.

Experiență. Circuitul unei bobine se închide printr-un galvanometru (fig. 4.1, a). Neexistînd generator în circuitul electric, acul galvanometrului nu deviază. La introducerea unui magnet în bobină, se constată că acul galvanometrului deviază atîta timp cît magnetul intră în bobină, dar revine la zero cînd magnetul se oprește. La scoaterea magnetului din bobină acul galvanometrului deviază în sensul opus celui precedent. Prin urmare, la mișcarea magnetului în bobină ia naștere un curenț electric. Un asemenea curenț se numește *curenț indus*.

Se obțin aceleași rezultate dacă magnetul rămîne fix și se mișcă bobina (fig. 4.1, b).

Experiență. Se folosește aceeași bobină B , avînd în circuit un galvanometru. În această bobină B (fig. 4.2) poate fi introdusă o a doua bobină B_1 , cu diametru mai mic. Prin bobina B_1 , circulă un curenț produs de un generator A . Introducînd bobina B_1 în bobina B , atunci cînd prin B_1 circulă curenț electric, se constată că în circuitul bobinei B apare un curenț indicat de galvanometru. Acest curenț este un curenț indus și de aceea bobina B poartă numele de *indus* sau *bobină secundară*. Bobina B_1 se numește *bobină primară* sau *inductor*. Subliniem că firele conductoare ale celor două bobine nu sînt în legătură. Fiecare bobină aparține unui circuit separat. Curențul electric indus se menține cît timp se schimbă poziția relativă a bobinelor. Rezultatele sînt deci aceleași ca mai înainte, cînd în locul bobinei B_1 se folosea un magnet. Magnetul ca și bobina B_1 produc cîmp magnetic. În timpul cît se schimbă poziția relativă a magnetului sau inductorului B_1 față de bobina secundară,

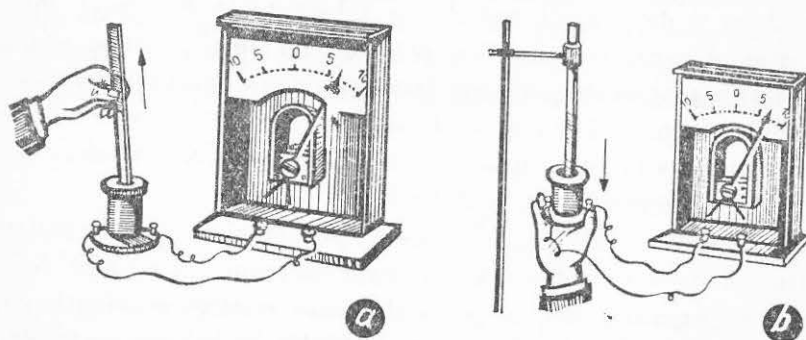


Fig. 4.1

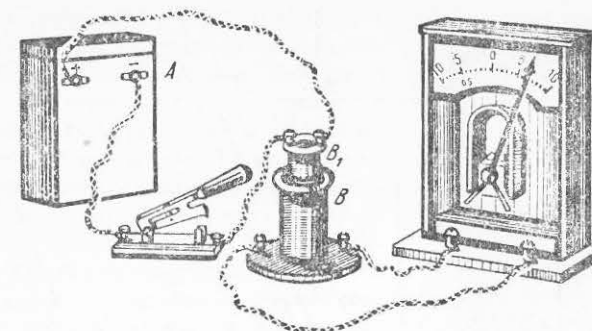


Fig. 4.2

aceasta este străbătută de un număr variabil de linii de cîmp, adică de un *flux magnetic variabil*. Acestui fapt i se datorează producerea în bobină a unei tensiuni electromotoare, care produce curenț indus.

- Fenomenul de producere a unei tensiuni electromotoare într-un circuit care înconjură un flux magnetic variabil se numește *inducție electromagnetică*.

Variația fluxului magnetic inductor poate fi produsă prin diferite metode. De exemplu, fluxul magnetic variază printr-un circuit care stă nemișcat într-un cîmp magnetic variabil (exemplu în fig. 4.1, a). Fluxul magnetic poate varia prin mișcarea circuitului în cîmp magnetic variabil (ca în fig. 4.1, b). Din cele arătate pînă aici rezultă că t.e.m. indusă durează numai atît cît durează cauza sa, variația fluxului inductor.

Cum am amintit mai înainte, sînt și alte mijloace de variație a fluxului magnetic inductor.

Experiență. Se folosește montajul din figura 4.2 și se introduce sau se scoate o bară de fier din bobina B_1 . Se produce un curenț indus foarte puternic. Deși curențul electric care circulă prin B_1 este constant, deci și cîmpul magnetic din bobina B e constant, introducerea miezului de fier face să crească numărul liniilor de cîmp de μ_r ori, adică fluxul inductor crește tot de μ_r ori. Așadar, în acest caz t.e.m. indusă este cauzată de variația fluxului inducției magnetice din bobina inductoare și mărimea ei depinde de valoarea permeabilității magnetice.

Fluxul magnetic inductor mai poate fi variat prin stabilirea sau întreruperea circuitului inductor, prin creșterea sau micșorarea intensității curențului inductor, prin deformarea circuitului secundar aflat într-un cîmp magnetic constant, precum și prin mișcarea unui conductor într-un cîmp magnetic constant, așa fel încît conductorul să intersecteze liniile cîmpului magnetic.

4.2. Mărimea tensiunii electromotoare induse

Se poate deduce expresia generală a legii inducției electromagnetice pe baza conservării energiei.

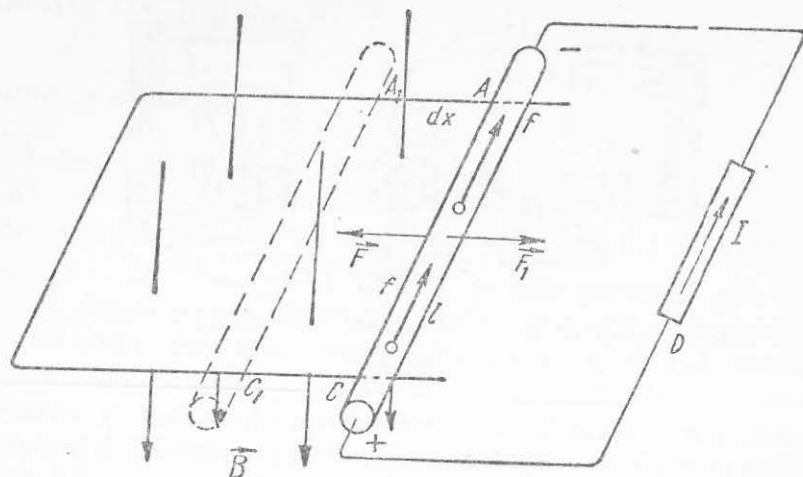


Fig. 4.3

Conductorul mobil de lungime $l = AC$ (fig. 4.3) este acționat de o forță exterioară $\vec{F}$, care-l deplasează pe o lungime foarte mică $dx = AA_1$, într-un interval de timp dt , efectuând lucrul mecanic $dL = Fdx$.

Datorită deplasării în câmpul de inducție $\vec{B}$, asupra fiecărui electron liber din conductor va acționa o forță lorentziană $\vec{f}$, având ca urmare încărcarea negativă a capătului A și pozitivă a capătului C . Între capetele conductorului apare o tensiune e . Dacă se închide circuitul $ACDA$, tensiunea indusă e devine t.e.m. pentru circuit, producând curentul mediu I . Ca urmare, conductorul mobil va fi supus unei forțe electromagnetice $F_1 = BIl$. Conform legii acțiunilor reciproce $\vec{F}_1 = -\vec{F}$. În aceste condiții $dL = -BIl dx$.

Conform legii conservării energiei, ca urmare a efectuării lucrului mecanic dL asupra sistemului material, el va trece într-o stare căreia îi va corespunde o creștere a energiei electrice cu o valoare $dW = dL$. Deoarece $dW = eIdt$, $dL = -BIl dx = eIdt$.

Dar $l dx = dS$ (aria măturată de conductor în deplasare) și $BdS = d\Phi$ (variația fluxului corespunzătoare deplasării conductorului), încît:

$$dL = -Id\Phi = eIdt$$

de unde se deduce:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi'(t) \quad (1)$$

numită *legea lui Faraday*.

Michael Faraday (1791—1867). Fizician și chimist englez. A început ca ucenic la un legător de cărți, apoi laborant, mai târziu asistent al lui Davy, apoi profesor. Foarte bun experimentator. A descoperit inducția electromagnetică (1831), legile electrolizei (1834), a demonstrat legea conservării sarcinii electrice (1843), a descoperit acțiunea câmpului magnetic asupra luminii. A introdus noțiunea de linii de câmp electric și linii de câmp magnetic etc. A constatat că acțiunile electrice și magnetice se transmit din aproape în aproape. Dezvoltarea acestor concepții de către Maxwell a dus la descoperirea undelor electromagnetice și la teoria electromagnetică a luminii.



Cîtul dintre variația fluxului magnetic inductor și intervalul de timp în care se produce această variație reprezintă cantitatea cu care variază fluxul inductor într-o unitate de timp. Acest cît poartă numele de *viteză de variație a fluxului magnetic inductor*. Așadar, legea inducției electromagnetice se enunță astfel:

Tensiunea electromotoare indusă este proporțională cu viteza de variație a fluxului magnetic inductor (derivata fluxului inductor în raport cu timpul).

Ca t.e.m. indusă să fie exprimată în volți, adică în unități SI, va trebui ca fluxul de inducție în relația 1 să fie exprimat, de asemenea, în unități SI, adică în weberi.

În cazul cînd bobina indusă nu are circuitul închis, prin ea nu circulă curent indus; în circuitul ei însă ia naștere o t.e.m. indusă, dacă ea intersectează un flux inductor variabil. O asemenea bobină se comportă ca un generator electric în circuit deschis: între capetele bobinei există o diferență de potențial egală cu t.e.m. indusă.

Curentul de inducție este determinat de existența câmpului electric. Deci, efectul direct al variației fluxului este apariția câmpului electric indus în regiunea circuitului. Maxwell a demonstrat teoretic și experiențele au confirmat că:

- Fenomenul de inducție electromagnetică se produce datorită unui câmp magnetic variabil, chiar în absența unui circuit. În absența circuitului, prin variația fluxului magnetic ia naștere un câmp electric indus, în general variabil (fig. 4.4, a) care are liniile de câmp închise. Deci, în sens mai larg, prin fenomenul de inducție electromagnetică se înțelege apariția unui câmp electric variabil în regiunea în care există un flux magnetic variabil.

Este evident că, dacă în regiunea fluxului magnetic variabil s-ar găsi un conductor (fig. 4.4, b) câmpul electric indus ar pune în mișcare electronii liberi din el, făcînd să apară astfel la capetele A și B o diferență de potențial. Dacă

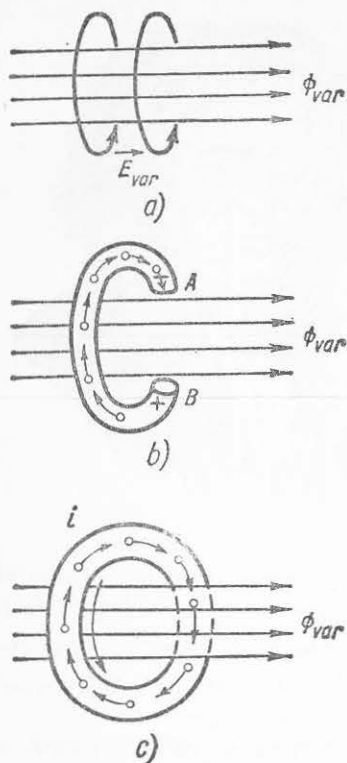


Fig. 4.4

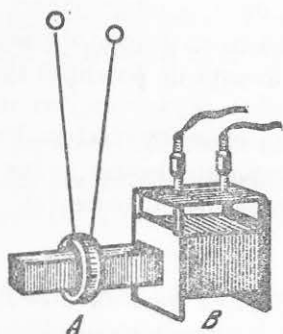


Fig. 4.5

Tensiunea indusă are un astfel de sens încât prin câmpul magnetic la care dă naștere, curentul indus se opune variației fluxului magnetic inductor. Din această cauză în formula (1) tensiunea indusă are semnul minus.

Să aplicăm această lege în cazul scoaterii magnetului din bobina secundară (fig. 4.6). Fluxul magnetic inductor scade, deci tensiunea indusă va genera un câmp magnetic indus de același sens cu câmpul inductor, pentru a împiedica

acest conductor ar constitui circuit închis, atunci naștere curentul indus, ca efect al t.e.m. induse (fig. 4.4, c).

4.3. Sensul tensiunii induse. Se constată experimental că sensul tensiunii induse depinde de sensul variației fluxului magnetic inductor.

Experiență. Se introduce un miez de fier într-o bobină B (fig. 4.5). La un capăt al miezului de fier, și fără a se atinge de el, se suspendă prin două fire un inel de aluminiu A . Se trece un curent electric prin bobină. În timpul stabilirii circuitului, inelul este respins de bobina inductoare B , în timp ce, la întreruperea curentului, inelul este atras.

La închiderea circuitului, curentul inductor și fluxul magnetic inductor cresc, adică $\Delta\Phi > 0$. Variația fluxului induce în inel un curent. Deoarece inelul este respins, înseamnă că, în spira de aluminiu, curentul indus este de sens contrar celui inductor din bobina B (interacțiune între curenți). Prin urmare, fluxul magnetic efect (indus) este de sens contrar fluxului magnetic cauză (inductor), când fluxul magnetic cauză (inductor) crește. *Fluxul indus se opune creșterii fluxului inductor.* La întreruperea curentului electric, fluxul magnetic inductor scade $\Delta\Phi < 0$, și induce un curent în inelul de aluminiu. Atragerea inelului arată că, în spira de aluminiu, curentul indus este de același sens celui inductor din bobina B . *Fluxul indus se opune scăderii fluxului inductor.*

H.F.E. Lenz (1804—1865) a generalizat, în 1833, aceste rezultate și a găsit o regulă cu ajutorul căreia se poate determina sensul curentului indus, în toate cazurile.

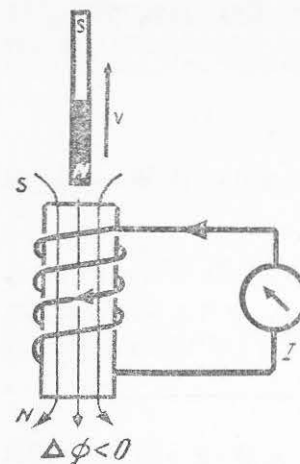


Fig. 4.6

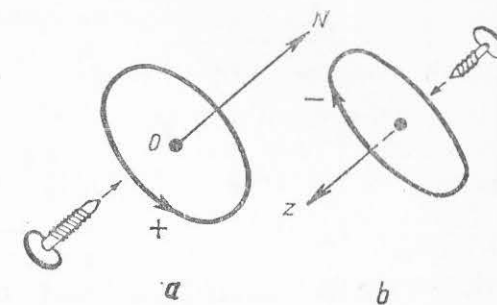


Fig. 4.7

scăderea fluxului inductor. Bobina secundară va forma un pol sud la capătul de care se depărtează polul nord al magnetului, ca să împiedice scăderea fluxului. Fenomenele se petrec asemănător în toate cazurile.

Sensul t.e.m. induse mai poate fi stabilit folosind spira de arie orientată (fig. 4.7). Se alege sensul pozitiv de parcurgere a conturului spirei ca la § 3.4 (sensul pozitiv al normalei ON la spiră este acela în care se deplasează un burghiu drept, care se rotește în sensul pozitiv de parcurs al spirei). T.e.m. și curenții induși în spiră au sensul pozitiv dacă sensul lor coincide cu sensul pozitiv ales pe spiră și au sensul negativ în caz contrar. Fluxul inductor prin circuitul spirei este pozitiv dacă are același sens cu normala la spiră.

Să considerăm un flux inductor Φ_d (fig. 4.8, a) de același sens cu normala la spiră, dar descrescător $\Delta\Phi < 0$. Legea inducției (1) duce la $\epsilon > 0$, de același sens cu sensul pozitiv pe spiră. Curentul indus este pozitiv, adică în sensul în care se rotește șurubul pentru a se deplasa în sensul normalei N .

Curentul indus va produce o inducție $\vec{B}_i$ de același sens cu fluxul inductor: fluxul indus se adună cu fluxul inductor și se opune scăderii acestuia din urmă.

Dacă fluxul inductor crește (fig. 4.8, b) lucrurile se petrec analog, dar în sens contrar

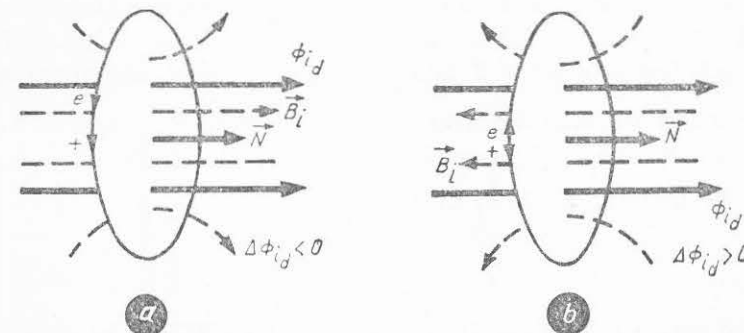


Fig. 4.8

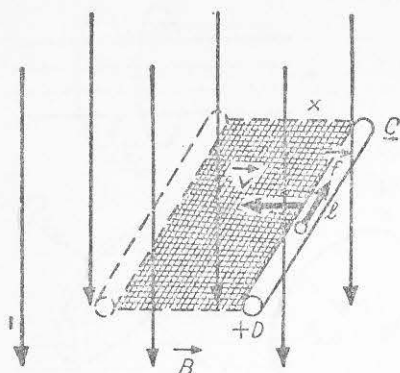


Fig. 4.9

4.5. Tensiunea indusă într-un conductor liniar. Să studiem sub alt aspect inducția electromagnetică produsă într-un conductor liniar care taie liniile cîmpului magnetic.

Experiență. Între polii unui electromagnet puternic se mișcă brusc un conductor liniar, perpendicular pe direcția liniilor de forță. Capetele conductorului sînt conectate la bornele unui miliampermetru. La fiecare mișcare a conductorului acul instrumentului deviază într-un sens ori altul, dovedind că în conductorul l , care intersectează liniile cîmpului magnetic, se naște o t.e.m. indusă. Tensiunea electromotoare indusă este cu atît mai mare cu cît viteza conductorului este mai mare.

Fie conductorul liniar, de lungime l , așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic de inducție $\vec{B}$ (fig. 4.9). Conductorul este mișcat cu viteza $\vec{v}$ constantă, de asemenea perpendiculară pe $\vec{B}$. Într-un interval de timp t conductorul se deplasează pe distanța $x = v \cdot t$, descriind o suprafață $S = l \cdot v \cdot t$. Conductorul va intersecta liniile de cîmp ce străbat această suprafață S , adică fluxul magnetic $\Phi = S \cdot B = B \cdot l \cdot v \cdot t$. Tensiunea indusă în conductor va fi:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - B \cdot l \cdot v, \quad (2)$$

adică:

$$e = - B \cdot l \cdot v.$$

Cînd conductorul este deplasat de-a lungul liniilor cîmpului magnetic, nu se induce tensiune în el, deoarece nu sînt intersectate linii de cîmp. Dacă viteza $\vec{v}$ face unghiul α cu $\vec{B}$, atunci:

$$e = - B \cdot l \cdot v \sin \alpha. \quad (3)$$

Aplicînd regula burghiului drept, cum s-a spus mai sus, se găsește sensul tensiunii induse ca în figura 4.9.

4.4. Unitatea de flux magnetic. Din legea inducției electromagnetice (1) se deduce:

$$\Delta \Phi = -e \cdot \Delta t$$

cu ajutorul căreia se poate stabili unitatea de flux de inducție:

$$\langle \Phi \rangle_{SI} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ weber (Wb)}.$$

Un weber este fluxul magnetic dintr-o spirală în care induce o t.e.m. de 1 volt, cînd scade uniform pînă la zero în timp de o secundă.

4.6. Explicarea electronică a inducției electromagnetice. Conductorul CD fiind deplasat cu viteza $\vec{v}$, perpendicular pe liniile cîmpului $\vec{B}$ (fig. 4.9.), toți electronii din el se mișcă, în timpul deplasării conductorului, paralel cu viteza $\vec{v}$, ceea ce echivalează cu un curent electric îndreptat în sens opus deplasării electronilor.

Fiecare electron liber se găsește în cîmpul de inducție magnetică $\vec{B}$, încît asupra fiecărui electron acționează o forță lorentziană $\vec{f}$. Forța lorentziană, exercitată de cîmpul magnetic asupra fiecărui electron liber, produce o deplasare a electronilor liberi înspre capătul C al conductorului, ceea ce are ca urmare aglomerarea lor la acest capăt, care se încarcă negativ, capătul D încărcîndu-se pozitiv. Între cele două capete ale conductorului deplasat în cîmpul magnetic apare o t.e.m. Oprind conductorul, forța lorentziană dispare, de asemenea t.e.m. indusă. Deplasînd conductorul în sens contrar, forța lorentziană se inversează și de asemenea t.e.m. indusă are sens contrar. Dacă se unesc capetele conductorului t.e.m. indusă în conductor generează un curent de inducție prin circuit.

Deci apariția tensiunii are două cauze:

a) mișcarea conductorului în cîmpul de inducție $\vec{B}$ (forța lorentziană deplasează electronii);

b) variația lui $\vec{B}$ generează $\vec{E}$ variabil.

B. AUTOINDUCȚIE

4.7. Producerea fenomenului de autoinducție. Într-o spirală (indus), ia naștere curent indus atunci cînd variază fluxul magnetic prin suprafața delimitată de spirală. Fluxul variabil poate fi produs fie prin mișcarea relativă a unui magnet față de spirală, fie prin variația curentului dintr-un circuit vecin (inductor). El mai poate fi produs prin variația curentului electric din însăși spira indusă, care joacă astfel și rolul de inductor.

Experiență. O bobină B cu spire multe, aflată pe ramura unui miez de fier închis (fig. 4.10), se conectează la o sursă de curent continuu de 4–6 V, avînd în circuit becululele B_1 și B_2 , lampa cu neon N , întrerupătorul. La închiderea

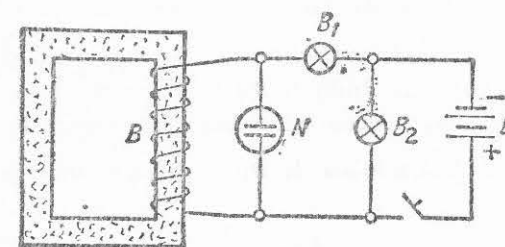


Fig. 4.10

circuitului se constată că becul B_2 luminează întâi, iar B_1 puțin mai târziu. Lampa cu neon nu luminează, ea avînd nevoie de o tensiune de aprindere de cîteva zeci de volți. Se deșurubează becul B_2 (pentru a nu scurtcircuita lampa cu neon), apoi se închide circuitul. La deschiderea lui se constată o scurtă licărire a lămpii cu neon.

La închiderea circuitului, curentul din bobină, deci și din becul B_1 , crește de la zero pînă la o valoare maximă. Această creștere durează un scurt interval de timp; în acest timp fluxul magnetic din bobină crește și el de la zero la o valoare maximă corespunzătoare curentului electric. Această creștere a fluxului delimitat de bobină induce, tot în bobină, un curent, care se suprapune peste curentul principal. Prin bobină vor circula temporar doi curenți suprapuși: curentul principal, produs de sursa E , și *curentul autoindus*, produs de t.e.m., autoindusă în spirală. Potrivit legii lui Lenz curentul autoindus va avea sensul opus curentului principal, opunîndu-se creșterii curentului principal. De aceea, becul B_1 luminează mai târziu decît B_2 , prin care circulă curent ce nu trece prin bobină.

La întreruperea circuitului, curentul din bobină scade, ceea ce face să scadă fluxul magnetic din bobină. Se produce un curent autoindus, de același sens cu curentul principal, adică se va aduna cu el și se va opune scăderii curentului principal.

Tensiunea totală (a sursei plus cea autoindusă) va deveni atît de mare (un timp scurt) încît va „aprinde” becul cu neon. Fenomenul descris poartă numele de *autoinducție*.

- Autoinducția este inducția electromagnetică produsă într-un circuit datorită variației curentului care circulă prin acel circuit.

Autoinducția se produce nu numai la stabilirea sau întreruperea unui curent, ci ori de cîte ori variază intensitatea curentului electric din circuit.

4.8. Inductanța unui circuit. Curentul de intensitate I care circulă printr-un circuit generează în jurul său un cîmp magnetic de inducție $\vec{B}$, proporțional cu I . Ca urmare, circuitul va înconjura un flux de inducție propriu Φ , proporțional cu I :

$$\Phi = LI. \quad (1)$$

Factorul de proporționalitate L se numește coeficient de inducție proprie sau *inductanță* a circuitului. Inductanța unui circuit este numeric egală cu fluxul produs prin suprafața circuitului cînd este parcurs de unitatea de intensitate $L = \frac{\Phi}{I}$, $I = 1$ A. Unitatea de inductanță se deduce din relația:

$$\langle L \rangle_{SI} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}}.$$

care se numește henry*, cu simbol H. Un henry este inductanța unei spire în care ia naștere un flux magnetic propriu de 1 Wb, cînd spira este parcursă de 1 A.

Inductanța unui solenoid se calculează în felul următor: fluxul printr-o spirală este $\Phi_1 = BS$, iar fluxul total:

$$\Phi = BNS = \mu \frac{N^2 SI}{l} = LI,$$

de unde:

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l}. \quad (2)$$

4.9. Legea autoinducției. Deoarece autoinducția este un caz de inducție electromagnetică, legea ei se va deduce din:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -\Phi'(t),$$

de unde:

$$e = -L \frac{di}{dt} = -Li'(t), \quad (3)$$

adică *tensiunea autoindusă într-un circuit este proporțională cu viteza de variație a curentului din acel circuit.*

Ori de cîte ori variază intensitatea curentului dintr-un circuit, se nasc în acesta curenți autoindusi, care se suprapun peste curentul din circuit (curentul principal); *curentul autoindus la închiderea circuitului, ori la creșterea curentului principal este de sens contrar lui. Curentul autoindus la întreruperea circuitului, ori la scăderea curentului principal este de același sens cu el* (conform regulii lui Lenz).

Explicarea energetică a autoinducției. O parte din energia furnizată de sursă la închiderea circuitului este disipată prin efect electrocaloric de către rezistența circuitului, iar cealaltă parte este înmagazinată de cîmpul magnetic al curentului. Datorită acestui fapt, curentul crește mai încet la închiderea circuitului ori la creșterea intensității. La întreruperea circuitului sau la scăderea intensității, dispăre sau scade intensitatea cîmpului magnetic, de aceea el eliberează energia electromagnetică înmagazinată, ceea ce are ca urmare o prelungire a existenței curentului. Scînteia produsă la întreruperea unui circuit disipează această energie. În concluzie, *fenomenul de autoinducție se opune la orice variație a intensității curentului electric, adică se manifestă ca o inerție electromagnetică.*

4.10. Rolul autoinducției în tehnică. Deoarece t.e.m. autoindusă crește proporțional cu inductanța circuitului, un conductor sub forma unui fir întins va produce o autoinducție neglijabilă.

Dacă însă același fir este bobinat și mai ales dacă are și miez din fier, atunci firul are inductanța L mare, iar t.e.m. autoindusă va fi mare.

* Denumire dată în cinstea fizicianului Henry Joseph (1797—1878).

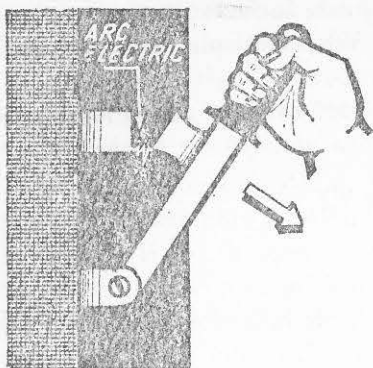


Fig. 4.11

Autoinducția prezintă o deosebită importanță în cazul curenților alternativi, deoarece cîmpul lor magnetic variază în orice moment. Proprietățile caracteristice curenților alternativ, care va fi studiat în capitolul următor, se datoresc în primul rînd autoinducției.

Între contactele unui întrerupător se produce un arc electric, datorită t.e.m. autoinduse la întreruperea circuitului. Așa se petrec lucrurile la întrerupătorul cu pîrghie (fig. 4.11), la tramvai cînd se depărtează troleul de linia de curent etc. Pentru a se evita topirea parțială și distrugerea pieselor între care se face contactul, se conectează un condensator paralel cu contactele întrerupătorului. Condensatorul absoarbe energia eliberată de cîmpul magnetic prin curenții de autoinducție, încărcîndu-se. În practica electrotehnică este nevoie de rezistențe fără inductanță. De aceea înfășurarea unor asemenea rezistențe se face cu o sîrmă îndoită. Arabele jumătăți ale sîrmei sînt înfășurate una lângă alta (fig. 4.12), încît sînt parcurse de curent în sensuri opuse, iar cîmpurile magnetice își anihilează reciproc acțiunea magnetică. O asemenea înfășurare se numește bifilară.

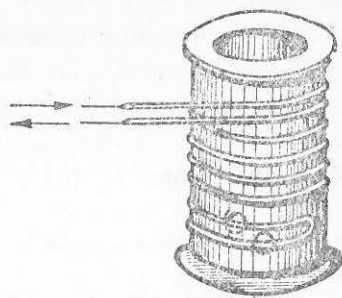


Fig. 4.12

5. CURENT ALTERNATIV

A. TENSIUNI ELECTROMOTOARE ALTERNATIVE

5.1. Producerea t.e.m. alternative. În electrotehnică este mai puțin folosit curentul continuu. Cea mai largă întrebuințare o are curentul alternativ, care poate fi ușor produs, ușor transportat la distanță și, de asemenea, cu ușurință folosit. Obținerea curenților alternativ se bazează pe fenomenul inducției electromagnetice. Acest fenomen permite obținerea de t.e.m. variabile. Dacă variația t.e.m. este sinusoidală curenții se numesc alternativ sinusoidal. T.e.m. alternativă se poate obține pe două căi; rotirea uniformă a unei spire într-un cîmp magnetic uniform sau prin rotirea unui magnet (cîmp magnetic) în fața unei bobine fixe.

a) O spiră metalică este rotită uniform în jurul axei AB (fig. 5.1) într-un cîmp magnetic produs de un electromagnet NS . Capetele spirei sînt conectate la două inele C și D , care pot aluneca sub perii P_1 și P_2 . Un rezistor R închide circuitul exterior prin perii. Din cauza rotirii spirei, fluxul de inducție care o străbate variază în fiecare moment, ceea ce face să apară în ea o t.e.m. de inducție, alternativă sinusoidală. Acul unui instrument de măsurat

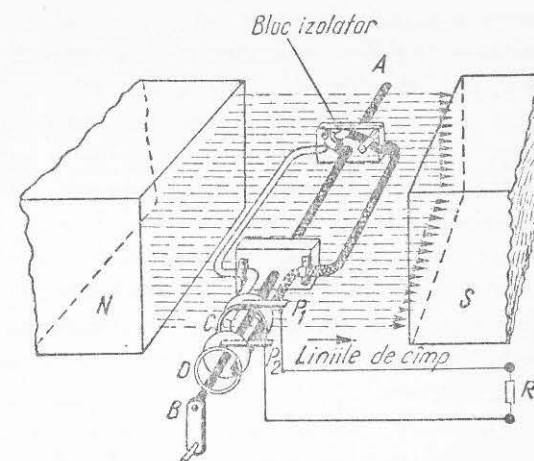


Fig. 5.1

care ar fi introdus în circuit în serie cu rezistorul ar oscila de o parte și de alta a poziției zero, indicînd existența unui curent alternativ. Să analizăm mai de aproape acest fenomen. În poziția a (fig. 5.2) planul spirei este perpendicular pe liniile de cîmp, normala $\vec{n}$ la fața spirei face unghiul $\alpha = 0$ cu liniile cîmpului; într-un interval de timp dt foarte mic, laturile orizontale ale spirei se mișcă foarte puțin, dar în această poziție nu taie liniile cîmpului. În acest interval de timp, variația fluxului $d\Phi$ este nulă, deci în spirală nu se induce t.e.m. Pe măsură ce spira se rotește, laturile ei încep să taie linii de cîmp din ce în ce mai multe în unitatea de timp, în spirală se generează t.e.m. din ce în ce mai mare, atîngînd valoarea maximă E_m , cînd planul spirei devine paralel cu liniile de cîmp iar, normala $\vec{n}$ face unghiul $\alpha = \frac{\pi}{2}$ cu liniile cîmpului. În această poziție b valoarea fluxului este nulă, dar variația lui are va-

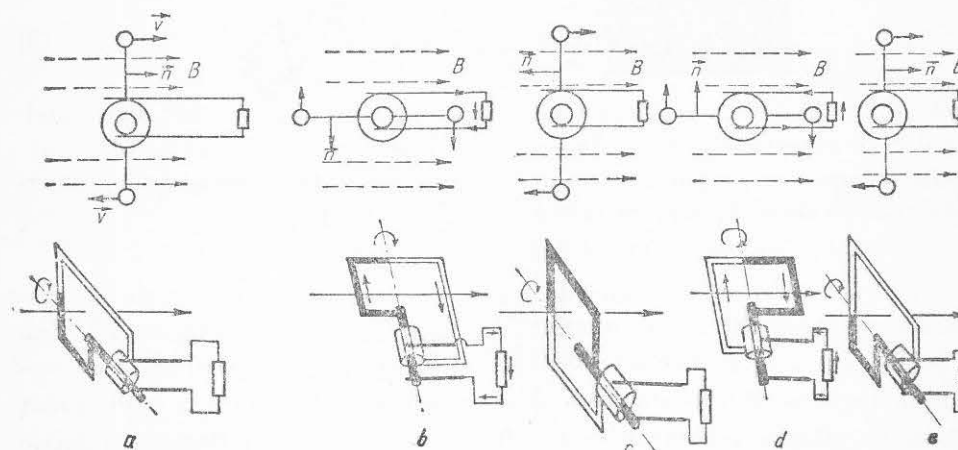


Fig. 5.2

loarea maximă, deoarece laturile spirei taie cele mai multe linii de câmp în unitatea de timp. Tensiunea indusă are sensul spre noi în latura din dreapta, de la noi spre figură în latura din stânga. Continuând rotirea din poziția *b* către poziția *c*, laturile spirei taie mereu mai puține linii în unitatea de timp, t.e.m. indusă scade treptat, iar în poziția *c* a spirei, când $\alpha = \pi$, devine nulă. Spira își continuă rotirea din poziția *c* spre *d* apoi spre *e*; fenomenele se succed la fel ca mai înainte, în ceea ce privește valoarea numerică, dar sensul este opus deoarece liniile câmpului intră pe cealaltă față a spirei. Când spira a ajuns în poziția *e*, ea repetă poziția din *a* etc. Variațiile succesive ale t.e.m. sînt arătate de curba sinusoidală din figura 5.5. Se observă că t.e.m. indusă are succesiv valori într-un sens, apoi în sens opus: este o t.e.m. alternativă.

Deoarece spira se rotește uniform cu viteza unghiulară ω , considerînd ca moment inițial, momentul în care spira s-a aflat în poziția *a*, $\alpha = \omega t$ este unghiul făcut de normala $\vec{n}$ la fața spirei cu liniile câmpului la momentul *t*. Fluxul de inducție prin aria spirei la momentul dat *t* este: $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, unde $\Phi_m = BS$ este valoarea maximă a fluxului (cînd $\alpha = 0$). T.e.m. indusă în spirală va fi dată de legea inducției electromagnetice:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t.$$

Notînd valoarea maximă a t.e.m. induse, cu $E_m = \omega \Phi_m$, atunci valoarea instantanee *e* a tensiunii va fi:

$$e = E_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Dacă circuitul exterior este închis printr-o sîrmă fără înfășurări, se va produce un curent alternativ sinusoidal, a cărui intensitate va fi:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2)$$

unde I_m este valoarea maximă a intensității curentului alternativ, sinusoidal. Așadar, în curentul alternativ sinusoidal, tensiunea și intensitatea variază sinusoidal în raport cu timpul. Ele trec prin aceleași valori și în același sens la intervale egale de timp *T*, numite perioade.

Perioada și frecvența sînt mărimi inverse una alteia.

b) Prin rotirea unui magnet în fața unei bobine se poate obține, de asemenea, tensiune alternativă sinusoidală, după montajul din figura 5.3. Sub o bobină cu miez de fier se rotește un magnet bară, în jurul unui ax orizontal. Instrumentul de măsurat indică producerea în bobină a unui curent alternativ. Bobina este străbătută în fiecare moment de un flux de inducție variabil, care induce în bobină o t.e.m. alternativă.

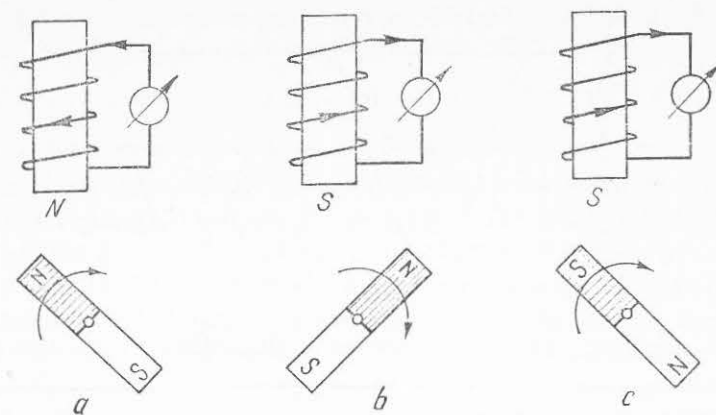


Fig. 5.3

Variația sinusoidală a curentului alternativ se poate demonstra experimental cu ajutorul osciloscopului magnetic. El constă dintr-o buclă metalică *B* (fig. 5.4) pe care este fixată o mică oglindă *O*. Bucla cu oglindă se află între polii unui magnet puternic. Pe *O* cade un fascicul de lumină produs de lampa *L*, concentrat de un condensor, apoi limitat de fanta circulară *F*. Cu lentila *L*, avînd distanța focală de 10 ... 15 cm, se proiectează imaginea fantei *F* pe ecran, după reflectarea pe *O* și pe oglinda rotitoare *R*. T.e.m. alternativă generată de spira rotitoare (fig. 5.1) sau de bobina din figura 5.3 este adusă la bornele B_1B_2 de la care se alimentează bucla osciloscopului magnetic. Firele buclei fiind parcurse de curent alternativ și aflîndu-se în câmpul magnetului vor fi deviate alternativ de forțele electromagnetice. Oglinda *O* va oscila în jurul unui ax paralel cu firele. Oglinda rotitoare este rotită în jurul unui ax perpendicular pe firele buclei și ca urmare, pe ecranul *E* apare o sinusoidă luminoasă.

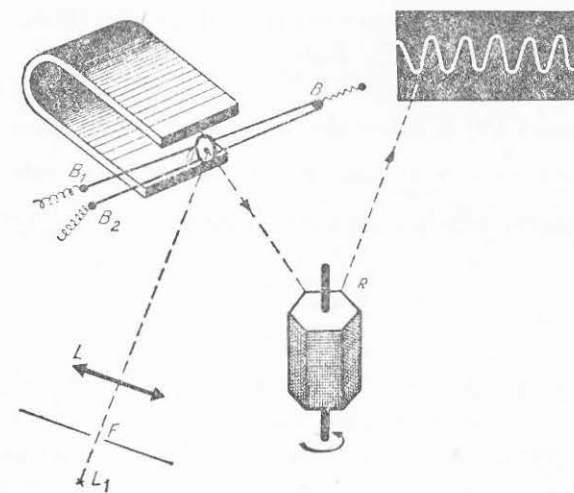


Fig. 5.4

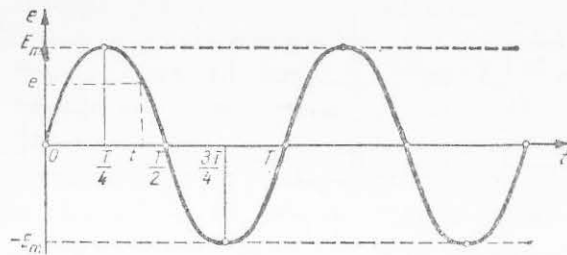


Fig. 5.5

5.2. Caracteristicile mărimilor alternative sinusoidale. S-a arătat că tensiunea alternativă (intensitatea) este o funcție sinusoidală de timp (formulele (1), (2)). Ea se va reprezenta grafic printr-o sinusoidă (fig. 5.5) înscriind pe abscisă timpul, iar pe ordonată valorile instantanee ale tensiunii (intensității). După cum se știe, orice mărime sinusoidală este caracterizată prin: *amplitudine* și *elongație*, *perioadă* și *frecvență*, *fază*.

După cum se observă funcția $e = E_m \sin \omega t$ este periodică. Fie T intervalul de timp după care funcția ia aceeași valoare. În acest interval de timp argumentul a crescut cu 2π . Deci, $E_m \sin \omega(t + T) = E_m \sin(\omega t + 2\pi)$, de unde se deduce: $\omega t + \omega T = \omega t + 2\pi$, sau $\omega T = 2\pi$, și

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (3)$$

adică după un interval de timp t egal cu această valoare, tensiunea (intensitatea curentului alternativ sinusoidal) trece prin aceeași valoare. T se numește *perioadă*.

Amplitudinea este valoarea maximă E_m a tensiunii (I_m , pentru intensitate). Amplitudinea este o mărime esențialmente pozitivă. Elongația sau valoarea instantanee este valoarea tensiunii e sau u (a intensității i) la un moment dat t ; ea poate lua valorile: $e \in (-E_m, E_m)$.

Perioada T și frecvența ν . Perioada se măsoară în secunde. Raportul între numărul de perioade (N) și intervalul de timp corespunzător Δt se numește frecvență (ν). Deci: $\frac{N}{\Delta t} = \nu$. De aici se vede că frecvența este numeric egală cu numărul de perioade în unitatea de timp:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Frecvența se măsoară în herți* (Hz sau s^{-1}). Un hertz este frecvența unui curent alternativ cu perioada de o secundă. Curentul alternativ industrial are frecvența standardizată la 50 Hz, deci are perioada $T = 2 \cdot 10^{-2}$ s. În radio-

* După numele fizicianului Heinrich Hertz (1857–1894).

tehnică se folosesc curenți cu frecvența de ordinul sutelor de kHz, iar în televiziune, de ordinul de mărime al sutelor de MHz.

Mărimea $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ [relațiile (3) și (4)] se numește *pulsație* și reprezintă numărul de perioade efectuate în 2π unități de timp (secunde)].

Faza tensiunii (intensității) este reprezentată prin valoarea argumentului sinusului din expresia tensiunii (intensității) — formulele (1) și (2) — la un moment dat. Fie două spire rotitoare 1 și 2 (fig. 5.6, a) așezate coaxial, așa fel ca la momentul inițial $t = 0$, planul celei dintii să facă unghiul φ_1 cu planul neutru (planul de referință), iar planul celei de-a doua să facă unghiul φ_2 cu același plan neutru. Aceste două unghiuri φ_1 și φ_2 determină fazele inițiale ale tensiunilor. Dacă spirele se rotesc solidar, cu viteza unghiulară constantă ω , în sens antiorar, în fiecare spirală se va genera câte o t.e.m. sinusoidală. Aceste tensiuni au aceeași valoare maximă E_m , aceeași perioadă T , dar se deosebesc prin fază. Ele nu trec în același moment prin valoarea maximă ori prin valoarea nulă. Tensiunea din spira 1 va avea la momentul t valoarea $e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1)$, iar tensiunea din spira 2 va avea, în același moment, valoarea $e_2 = E_m \sin(\omega t + \varphi_2)$. Diagramele lor se văd în figura 5.6, b. Se observă că, la momentul t , tensiunile e_1 și e_2 se deosebesc numai prin fază; prima are faza $\omega t + \varphi_1$, a doua are faza $\omega t + \varphi_2$. Cele două tensiuni sînt defazate una față de alta. Prima tensiune e_1 ajunge la valoarea maximă înaintea celei de-a doua e_2 : este defazată în avans cu $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ față de e_2 , iar e_2 este defazată în urma lui e_1 cu aceeași diferență de fază φ . Diferența de fază se mai numește și defazaj.

5.3. Moduri de reprezentare ale mărimilor alternative. Mărimile alternative tensiune și intensitate se pot reprezenta în trei moduri: analitic, prin formule ca (1) și (2), grafic prin sinusoidă ca în figura 5.5 și prin *fazori*.

Reprezentarea analitică pune în evidență valoarea maximă, faza, pulsația, faza inițială și valoarea instantanee a mărimii respective. Are dezavantajul că nu dă o imagine a acestor mărimi.

Reprezentarea grafică este mai intuitivă. Pe ordonată se reprezintă valorile instantanee ale mărimii — u sau i — la o scară convenabil aleasă. Pe abscisă

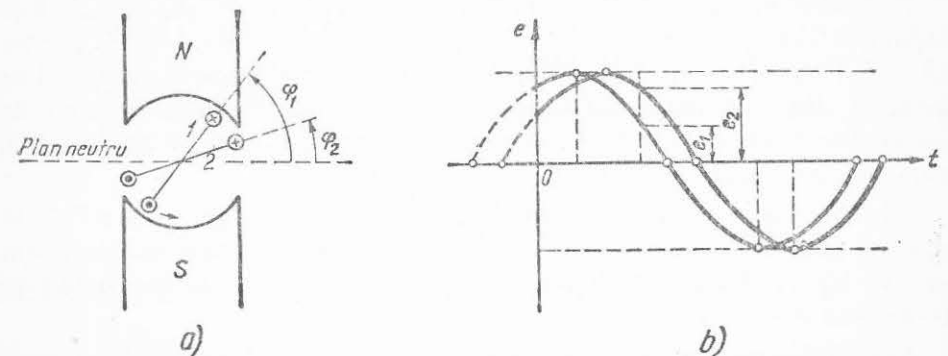


Fig. 5.6

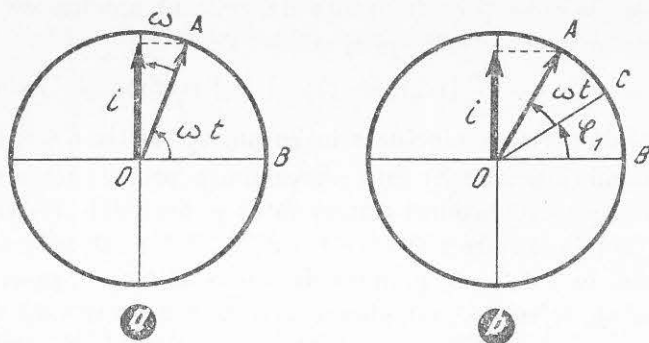


Fig. 5.7

se reprezintă valorile timpului față de origine. Prin reprezentarea grafică se pun în evidență valoarea maximă, faza inițială, perioada și valoarea instantanee.

Reprezentarea prin fazori este mai simplă, mai intuitivă și permite calcule relativ simple cu mărimile sinusoidale.

Fazorul este un vector rotitor. El este determinat prin: lungime (valoare numerică), unitatea de măsură și unghiul de fază. Lungimea fazorului este egală, la scara aleasă (pentru unitate), cu valoarea maximă, ori cu valoarea efectivă a mărimii alternative care se reprezintă (fig. 5.7).

Unitatea aleasă se menționează pe grafic: de exemplu 1 cm corespunde la 0,5 A sau la 100 V.

Fazorul se rotește în jurul originii O în sens antiorar, cu viteza unghiulară constantă, egală cu pulsația ω a mărimii alternative. Unghiul de fază este unghiul făcut de fazor cu axa absciselor. Proiecția fazorului pe ordonată dă, în fiecare moment, valoarea instantanee a mărimii alternative reprezentate. De exemplu, intensitatea i a curentului alternativ, dată de formula (2), se reprezintă fazorial ca în figura 5.7, *a*. La momentul inițial fazorul ocupa poziția OB , cu faza inițială nulă. Dacă intensitatea i are faza inițială $\varphi_1 \neq 0$, ea se exprimă analitic prin $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_1)$.

Reprezentarea ei fazorială este în figura 5.7, *b*. Fazorul de lungime I_m ocupa inițial poziția OC , cu faza inițială φ_1 . La momentul t , fazorul trece prin poziția OA , având faza $\omega t + \varphi_1$; valoarea instantanee i se obține proiectând fazorul pe ordonată. Unghiul dintre doi fazori, care reprezintă mărimi alternative de aceeași frecvență, dar de faze diferite, reprezintă diferența de fază a celor două mărimi alternative.

5.4. Efectele curentului alternativ. Curentul alternativ are aceleași efecte ca și cel continuu: electrocaloric, electrochimic și electromagnetic. Unele din ele însă depind de sensul curentului și de aceea capătă aspecte deosebite față de aceleași efecte în curentul continuu.

Efectul electrocaloric sau Joule se manifestă la fel ca și la curentul continuu, deoarece dezvoltarea de căldură nu depinde de sensul curentului: $Q = RI^2t$;

pentru calcularea cantității de căldură degajată de curentul electric se folosește aceeași formulă în curentul alternativ ca și în cel continuu, unde I este intensitatea efectivă.

Efectul electrochimic depinde de sensul curentului; la catod se depun cationii, la anod se depun anionii. De aceea nu se poate face electroliza cu curent alternativ. De exemplu, în cazul apei s-ar obține la fiecare electrod cite un amestec de un volum oxigen și două volume hidrogen.

Efectul electromagnetic, de asemenea, depinde de sensul curentului. De aceea, un conductor prin care circulă curent alternativ generează în jurul său cîmp magnetic, care are liniile de aceeași formă ca în cazul curentului continuu, dar în fiecare punct modulul inducției magnetice, B , variază sinusoidal în funcție de timp. Din cauza inerției, acul magnetic nu poate urmări aceste variații rapide și deci nu deviază în cîmpul magnetic alternativ. Se poate dovedi experimental existența cîmpului magnetic alternativ prin experiența lui Thomson. Se așază pe masă o bobină, în care se introduce un miez de fier vertical, care iese din bobină. În timp ce bobina este alimentată cu curent alternativ, este introdusă într-un cadru de mai multe spire, avînd în serie un becuțel: acesta luminează, dovedind producerea unui fenomen de inducție electromagnetică, produs de cîmpul magnetic alternativ. Repetînd experiența cu curent continuu, becuțul nu luminează. În locul spirei cu becuțul se poate folosi un inel din fier. Lăsîndu-l să cadă în jurul miezului, el este azvirlit cu putere în sus. Cauza este tot fenomenul de inducție electromagnetică și manifestarea regulii lui Lenz.

5.5. Valori instantanee, maxime și efective ale curentului alternativ. În paragrafele anterioare s-a arătat ce sînt valorile instantanee și valorile maxime ale tensiunii și intensității la curentul alternativ sinusoidal. În electrotehnică se mai folosește două valori ale acestor mărimi: *valoarea medie* și *valoarea efectivă*.

Importanță practică prezintă valorile efective E (U), I ale tensiunii și intensității. Acestea sînt valorile indicate de instrumentele de măsurat. Valoarea efectivă a intensității se definește pe baza efectului electrocaloric, deoarece dezvoltarea de căldură nu depinde de sensul curentului electric.

- Valoarea efectivă (I) a intensității curentului alternativ este egală cu intensitatea unui curent continuu, care dezvoltă aceeași cantitate de căldură ca și curentul alternativ, trecînd prin același rezistor (cu aceeași rezistență), în același interval de timp.

Ea este dată de formula:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m,$$

în mod analog tensiunea efectivă U sau E va fi:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m.$$

Aceste relații se pot justifica destul de ușor. Printr-un rezistor de rezistență R circulă un curent alternativ $i = I_m \sin \omega t$, care produce într-un timp foarte mic dt , o variație a energiei interne a conductorului $dW = Ri^2 dt = RI_m^2 \sin^2 \omega t dt$. Dar se știe că

$$\cos 2\omega t = \cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t$$

$$\Rightarrow \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \text{ înlocuim:}$$

$$dW = RI_m^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \right) dt$$

sau

$$\frac{dW}{dt} = W'(t) = \frac{RI_m^2}{2} (1 - \cos 2\omega t).$$

Dar funcția $W(t)$ care prin derivare dă membrul doi al ecuației este:

$$W(t) = \frac{RI_m^2}{2} \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) + C.$$

Pentru o perioadă, variația energiei interne (cantitatea de căldură) dezvoltată va fi diferența între valoarea energiei la momentul T și respectiv la momentul inițial ($t = 0$). Înlocuind în expresia de mai sus, se obține:

$$\Delta W = W - W_0 = \frac{RI_m^2 T}{2}.$$

În același interval de timp T , datorită aceleiași rezistențe R la trecerea unui curent continuu de intensitate I , energia internă va varia cu:

$$\Delta W = RI^2 T.$$

Se deduce succesiv:

$$RI^2 T = \frac{RI_m^2 T}{2},$$

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

cum s-a arătat mai înainte.

B. CIRCUITE ÎN CURENT ALTERNATIV

5.6. Rezistor în curent alternativ. Un circuit electric poate conține următoarele trei elemente: un rezistor cu rezistența R , o bobină cu inductanța L , un condensator cu capacitatea C . Pot fi circuite care conțin numai unul din acești parametri: R , L sau C . De exemplu, un circuit format din: un bec electric, un reșou, un reostat; poate fi socotit ca circuit având numai rezistența R , deoarece influențele inductanței sau capacității lui sînt neînsemnate și pot fi neglijate. Un cablu care lucrează în gol poate fi considerat ca o capacitate, deoarece rezistența și inductanța lui au influență neglijabilă. În cazul circuitului unui transformator neîncărcat se pot neglija rezistența și capacitatea, considerînd circuitul numai cu inductanță.

Să considerăm un circuit de curent alternativ cu rezistență R (fig. 5.8, a). La bornele lui se conectează o tensiune alternativă $u = U_m \sin \omega t$. Deoarece transformarea de energie prin efect Joule nu depinde de sensul curentului, rezistența activă se comportă în curentul alternativ la fel ca și în curentul continuu. Se poate aplica legea lui Ohm $U = RI$, iar între tensiune și intensitate nu se produce nici o defazare.

La bornele rezistenței tensiunea și intensitatea sînt în fază (fig. 5.8, b, c) adică u și i trec simultan prin valorile maxime sau cele nule. Puterea electrică ce caracterizează viteza de transformare a energiei electrice în altă formă de energie va fi

$$P = UI, \text{ iar energia consumată în timpul } t \text{ va fi:}$$

$$W = Pt = UIt.$$

5.7. Bobină în curent alternativ. Se consideră un circuit care conține o bobină cu inductanța L , avînd R și C neglijabile (fig. 5.9, a) iar la bornele lui se aplică o tensiune alternativă u . Prin bobină va circula un curent alternativ $i = I_m \sin \omega t$, care va produce un cîmp magnetic variabil. Ca urmare, în bobină se va autoinduce o tensiune $e_a = -L \frac{di}{dt} = -L\omega I_m \cos \omega t$. Ea va fi opusă tensiunii aplicate la borne u și va trebui să fie echilibrată de ea (fig. 5.9, b): $u = -e_a = L\omega I_m \cos \omega t$. Expresia $L\omega I_m = U_m$ reprezintă valoarea maximă a tensiunii, deci:

$$U = U_m \cos \omega t = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Comparînd cu expresia lui i se constată că: la bornele unei bobine în curent alternativ tensiunea este în avans de fază cu $\frac{\pi}{2}$ față de intensitate (fig. 5.9, c). Prin

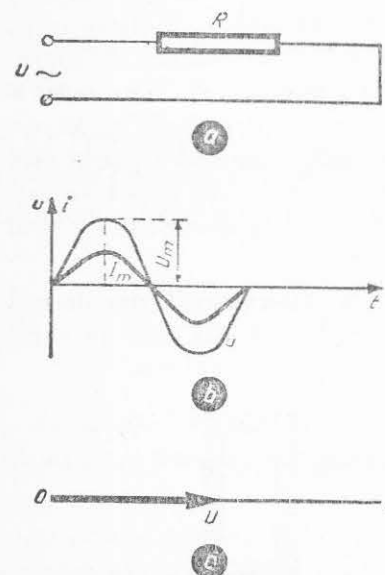


Fig. 5.8

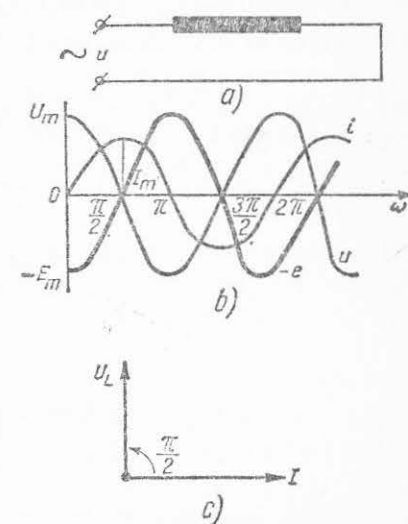


Fig. 5.9

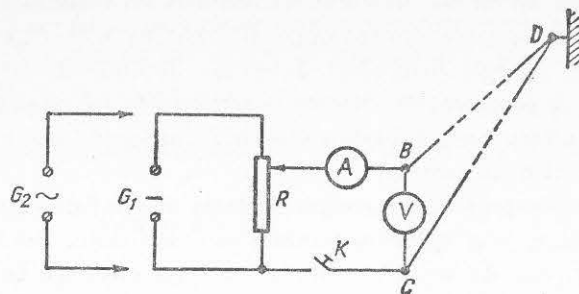


Fig. 5.10

comparație cu legea lui Ohm se observă că în expresia $U_m = L\omega I_m$ produsul $L\omega = X_L$ joacă rolul unei rezistențe. Se numește *reactanță inductivă* X_L :

$$X_L = \omega L.$$

(1)

Reactanța inductivă este o rezistență aparentă, care depinde numai de inductanța bobinei și de frecvența curentului alternativ. Reactanța inductivă se măsoară în ohmi. În bobină nu se transformă energia electrică în energie internă, deci nu se produc pierderi în circuit. În concluzie: *o bobină produce în curent alternativ defazarea tensiunii înaintea intensității și introduce o rezistență aparentă, numită reactanță inductivă.*

Observație. Din (1) se observă că o bobină cu o inductanță mare, conectată la o tensiune alternativă de înaltă frecvență, introduce o reactanță inductivă atât de mare încât curentul nu mai trece. Se numește *bobină de șoc*.

Experiențele care urmează demonstrează aceste concluzii. Cu ajutorul unei instalații potențiometrice R , alimentată de o sursă continuă G_1 de câțiva volți, se face montajul din figura 5.10, în care BDC este un fir foarte subțire din cupru, izolat și lung de 10 ... 15 m, fără înfășurări și fixat într-un cui D . Voltmetrul V și ampermetrul A indică tensiunea la bornele firului și curentul din el. Menținând același montaj, se înlocuiește sursa de tensiune continuă G_1 prin alta de tensiune alternativă G_2 , de aceeași valoare. Ampermetrul indică aceeași intensitate ca în curentul continuu. Se repetă cele două experiențe la fel, firul fiind înfășurat pe un miez din fier divizat (fig. 5.11).

De data aceasta, intensitatea în cazul curentului alternativ devine de mai multe ori mai mică, deci reactanța firului înfășurat este mai mare în cazul curentului alternativ decât rezistența în cazul curentului continuu.

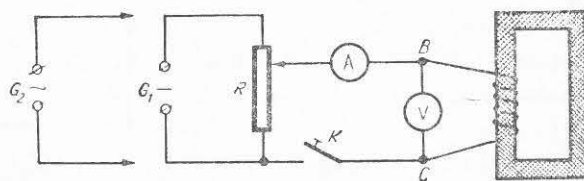


Fig. 5.11

5.8. Condensator în curent alternativ. Se consideră un circuit care conține un condensator cu capacitatea C , având R și L neglijabile (fig. 5.12). Dacă la bornele lui se aplică o tensiune continuă, curentul nu circulă, deoarece condensatorul întrerupe circuitul de curent continuu, prin dielectricul dintre armăturile lui. Dacă se aplică la borne o tensiune alternativă, curentul circulă. *Condensatorul închide circuitul de curent alternativ.* Fenomenul se explică astfel. La bornele condensatorului tensiunea variază necontenit. La creșterea tensiunii condensatorul se încarcă, primind sarcini electrice Q , iar la scăderea tensiunii se descarcă cedind sarcini electrice Q ; apoi tensiunea crește în sens opus etc. Ca urmare tensiunea aplicată la borne $u = U_m \sin \omega t$ face să apară un curent $i = \frac{dQ}{dt}$. Însă $dQ = C \cdot du$, deci:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \cdot u'(t) = C\omega U_m \cos \omega t.$$

Expresia $C\omega U_m$ reprezintă valoarea maximă a curentului adică $I_m = C\omega U_m$ încât curentul într-un circuit cu condensator va fi:

$$i = I_m \cos \omega t = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Comparind cu expresia lui u se constată că: *la bornele unui condensator în curent alternativ intensitatea este în avans de fază cu $\frac{\pi}{2}$ față de tensiune* (fig. 5.12, b, c). Prin analogie cu legea lui Ohm se observă că în expresia $I_m = C\omega U_m$, produsul $C\omega$ joacă rolul unei conductanțe. Cu alte cuvinte în curentul alternativ produsul $C\omega$ joacă rolul unei rezistențe aparente numită *reactanță capacitivă* X_C :

$$X_C = \frac{1}{C\omega}.$$

(2)

Se constată că *reactanța capacitivă depinde numai de capacitatea condensatorului și de frecvența curentului alternativ.* Ea se măsoară în ohmi.

În condensator nu se transformă energie electrică în energie internă, deci nu se produc pierderi de putere în circuit. Așadar, reactanțele X_L și X_C nu dezvoltă căldură; numai rezistența activă R dezvoltă căldură; spunem că rezistența este singurul element disipativ de energie.

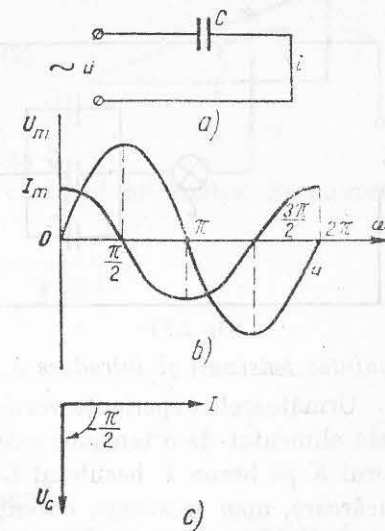


Fig. 5.12

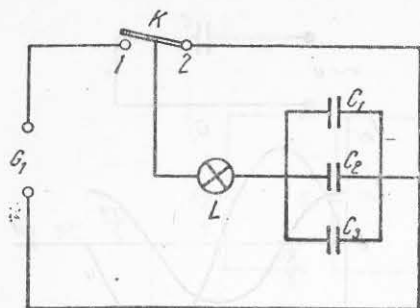


Fig. 5.13

înaintea tensiunii și introduce o reactanță capacitivă.

Următoarele experiențe verifică aceste concluzii. Montajul din figura 5.13 este alimentat de o tensiune continuă de 10 ... 15 V. Dacă se închide comutatorul K pe borna 1, becululeț L luminează un moment, indicând curentul de încărcare, apoi se stinge, curentul se întrerupe. Aducând comutatorul K pe borna 2, condensatorul se descarcă și becululeț luminează iar un moment. Se înlocuiește apoi sursa continuă G_1 cu alta alternativă de 4 V și se repetă experiența: becululeț L luminează tot timpul cât comutatorul stă pe borna 1.

5.9. Circuit cu rezistor, bobină și condensator. a) *Circuit serie.* Un circuit conține un rezistor de rezistență activă R , o bobină de inductanță L și un condensator de capacitate C , legate în serie și este alimentat de un generator cu o tensiune alternativă U (fig. 5.14, a). În el se stabilește un curent alternativ I . La bornele rezistorului se stabilește o cădere de tensiune U_R :

$$U_R = IR \text{ în fază cu } I;$$

la bornele bobinei se stabilește o cădere de tensiune U_L :

$U_L = I \cdot X_L$ în avans cu $\frac{\pi}{2}$ față de I ; la bornele condensatorului se stabilește o cădere de tensiune U_C :

$$U_C = I \cdot X_C$$

în urma lui I cu $\frac{\pi}{2}$.

Tensiunea la bornele circuitului U va fi suma vectorială a acestor căderi de tensiune, reprezentată pe diagrama fazorială (fig. 5.14, b). În triunghiul dreptunghic OBA , numit și triunghiul tensiunilor, se poate scrie:

$$U^2 = U_R^2 + U_X^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = I^2 R^2 + I^2 (X_L - X_C)^2$$

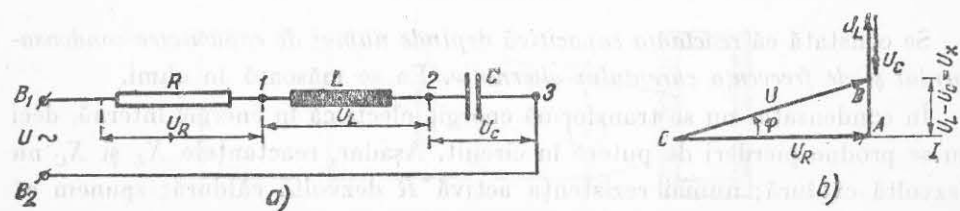


Fig. 5.14

sau

$$U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3)$$

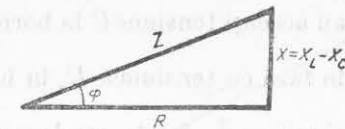


Fig. 5.15

Factorul care înmulțește pe I în expresia 3 joacă rol de rezistență și reprezintă rezistența echivalentă a întregului circuit serie pentru curentul alternativ. Se numește *impedanță* Z și se măsoară în ohmi:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4)$$

Expresia (3) devine:

$$U = IZ \quad (3')$$

și reprezintă *legea lui Ohm în curentul alternativ*.

Împărțind laturile triunghiului tensiunilor prin valoarea constantă I a intensității efective se obține un triunghi asemenea cu primul, având ca laturi rezistențele activă și reactivă: se numește *triunghiul impedenței* (fig. 5.15). Unghiul de defazaj φ se poate scrie:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (5)$$

din care se poate calcula defazajul φ dintre I și U la bornele circuitului. Tensiunea la bornele circuitului fiind dată de ecuația $u = U_m \sin \omega t$, formula intensității din circuit va fi:

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi).$$

b) *Circuit paralel.* Circuitul conține un rezistor cu rezistența R , o bobină cu inductanța L și un condensator cu capacitatea C , toate legate în paralel (fig. 5.16, a) la o tensiune alternativă U . Cele trei elemente din circuit R , L , C

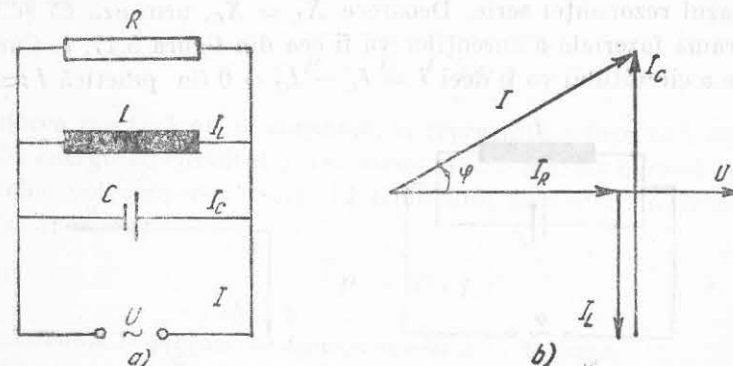


Fig. 5.16

au aceeași tensiune U la bornele lor. În rezistor se stabilește un curent $I_R = \frac{U}{R}$ în fază cu tensiunea U , în bobină se stabilește curentul $I_L = \frac{U}{X_L}$ în urma tensiunii cu $\frac{\pi}{2}$, iar în condensator un curent $I_C = \frac{U}{X_C}$ în avansă cu $\frac{\pi}{2}$ față de U . Considerind tensiunea U ca direcție de referință, diagrama fazorială a curenților va fi ca în figura 5.16, *b*. Pentru curenți de frecvență joasă ($\nu = 50$ Hz) teorema întâi a lui Kirchhoff rămâne valabilă. Deci intensitatea totală se calculează din triunghiul intensităților (fig. 5.16, *b*) în modul următor:

$$I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$$

sau

$$I^2 = \frac{U^2}{R^2} + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L} \right)^2 = \frac{U^2}{R^2} + U^2 \left(C\omega - \frac{1}{L\omega} \right)^2$$

sau

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega} \right)^2};$$

cum $I = \frac{U}{Z}$ înseamnă că radicalul corespunde lui $\frac{1}{Z}$, adică inversul impedanței. Unghiul de defazaj între I și U la bornele circuitului va fi

$$\operatorname{tg} \varphi = R \left(C\omega - \frac{1}{L\omega} \right).$$

Rezonanța intensităților. În circuitul paralel din figura 5.17, *a* să considerăm că s-a realizat condiția $X_L = X_C$ în care caz $C\omega - \frac{1}{L\omega} = 0$, deci $I = U \left(C\omega - \frac{1}{L\omega} \right) = 0$, iar impedanța circuitului $Z = \frac{1}{C\omega - \frac{1}{L\omega}} \rightarrow \infty$ (în practică foarte mare) pentru curenții care au frecvența ν_r corespunzătoare condiției $LC\omega^2 = 1$, de unde:

$$\nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ca și în cazul rezonanței serie. Deoarece $X_L = X_C$, urmează că și $I_L = I_C$, încît diagrama fazorială a curenților va fi cea din figura 5.17, *b*. Curentul de alimentare a circuitului va fi deci $I = I_L - I_C = 0$ (în practică $I \approx 0$, deoa-

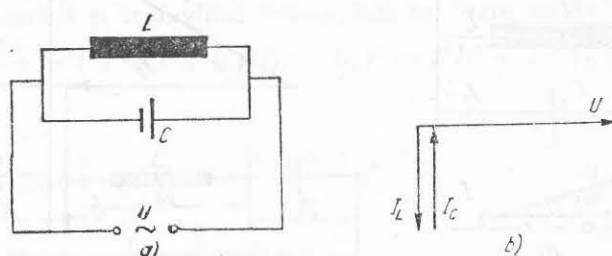


Fig. 5.17

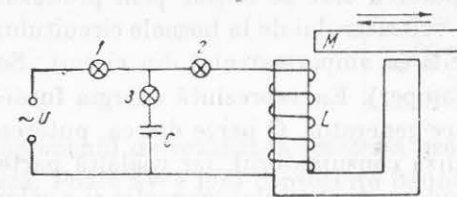


Fig. 5.18

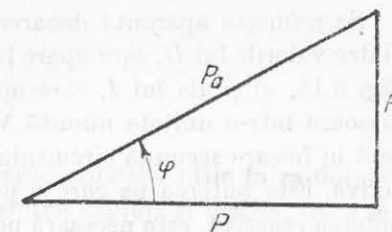


Fig. 5.19

rece I_L nu este exact opus lui I_C , bobina avînd și rezistență activă). Se spune că s-a produs *fenomenul de rezonanță paralel* sau *rezonanța intensităților*. Fenomenul se demonstrează experimental prin montajul din figura 5.18. Prin deplasarea lentă orizontală, într-un sens ori în cel opus, a miezului M se găsește poziția pentru care becul 1 se stinge (ori luminează minim). Deplasarea miezului M într-o parte sau alta a acestei poziții face să scadă lumina becului 2 ori 3 și să crească lumina becului 1, indicînd astfel curentul de alimentare minim (becul 1) pentru cazul rezonanței.

5.10. Puterea în curent alternativ monofazat. Înmulțind cu I laturile triunghiului tensiunilor (fig. 5.14, *b*) apare un triunghi asemenea cu primul, avînd ca laturi valorile puterilor (fig. 5.19). Se numește *triunghiul puterilor*. Cateta orizontală $P = U_R \cdot I$ reprezintă puterea activă, adică puterea disipată, sub formă de energie internă, în rezistența activă R . Se observă pe figura 5.14, *b* că $U_R = U \cdot \cos \varphi$, deci:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (6)$$

Factorul $\cos \varphi$ se numește *factor de putere* și reprezintă cosinusul unghiului de defazaj dintre tensiune și intensitate. Cu cit are valoarea mai mare — defazaj mai mic — cu atît puterea activă se apropie mai mult de valoarea maximă UI . Puterea activă se măsoară în wați. Cateta verticală $P_n = U_X \cdot I$ reprezintă *puterea reactivă*, adică puterea concentrată în cîmpurile magnetice și electrice, ale bobinelor și condensatoarelor din circuit. Deoarece $U_X = U \cdot \sin \varphi$, urmează că:

$$P_n = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (7)$$

Puterea reactivă nu se consumă, ci reprezintă viteza cu care generatorul schimbă energie cu circuitul. Ea se măsoară cu o unitate numită *var** (inițialele cuvintelor volt-ampere-reactiv). În triunghiul puterilor ipotenuza reprezintă *puterea aparentă*:

$$P_a = U \cdot I. \quad (8)$$

* Introdusă la propunerea inginerului român C. Budeanu.

Constantin Budeanu (1886—1959). Inginer român. A făcut lucrări importante în domeniul raționalizării sistemelor de unități în electricitate.

Se numește aparentă deoarece este puterea care se obține prin produsul dintre valorile lui U , care apare la citirea voltmetrului de la bornele circuitului (fig. 5.14, *a*) și ale lui I , care apare la citirea ampermetrului din circuit. Se măsoară într-o unitate numită VA (voltamper). Ea reprezintă energia furnizată în fiecare secundă circuitului de către generator. O parte din ea, puterea activă, este puterea pe care o poate utiliza consumatorul, iar cealaltă parte puterea reactivă, este necesară pentru producerea cimpului magnetic și a celui electric. Între aceste puteri există relația:

$$P_a^2 = P^2 + P_r^2.$$

5.11. **Rezonanța tensiunilor.** În circuitul serie din figura 5.14, *a* să considerăm că valorile inductanței L și ale capacității C sînt astfel alese încît *reactanța inductivă* X_L și *reactanța capacitivă* X_C sînt egale:

$$X_L = X_C.$$

În aceste condiții, tensiunile la bornele bobinei U_L și ale condensatorului U_C sînt egale și opuse (defazate cu π una față de alta):

$$U_L = -U_C.$$

Încît diagrama fazorială devine aceea din figura 5.20, *a*. Se observă că în acest caz reactanțele se compensează, iar impedanța Z se reduce la valoarea rezistenței active R , adică $Z = R$. De asemenea, defazajul dintre U și I la bornele circuitului se reduce la zero, ceea ce are ca urmare faptul că prin circuit curentul I_r are valoarea maximă $I_r = \frac{U}{R}$. Spunem că s-a produs fenomenul de *rezonanță serie sau rezonanța tensiunilor*. La bornele bobinei apare o tensiune $U_L > U$, iar la bornele condensatorului una egală cu U_L ; aceste tensiuni încarcă bobina, respectiv condensatorul, considerate separat — dacă sînt prea mari pot străpunge dielectricul condensatorului sau izolația bobinei — dar efectul lor global este nul. La rezonanță, bobina și condensatorul schimbă energia între ele în mod periodic, iar generatorul acoperă doar pierderile din circuit prin efect Joule. Pentru valorile lui L și C date, rezonanța se realizează pentru o anumită valoare a frecvenței ν_r :

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow 4\pi^2 \cdot \nu_r^2 = \frac{1}{CL},$$

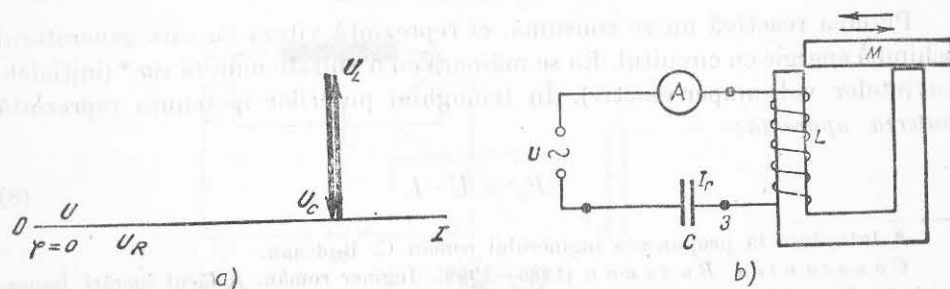


Fig. 5.20

de unde:

$$\nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (9)$$

Fenomenul de rezonanță electrică are importante aplicații utile în radiotehnică. Poate avea însă consecințe dăunătoare pentru cabluri și mașini, dacă se realizează întâmplător în rețelele electrice industriale. Următoarea experiență demonstrează rezultatele arătate mai înainte. Pe o ramură a miezului de fier în U se introduce o bobină de inductanță L de 600 ... 1 200 spire, legată în serie cu un condensator de capacitate $C = 16\mu F$ și un ampermetru A (fig. 5.20, *b*). Se închide circuitul magnetic cu miezul M , apoi se conectează tensiunea alternativă U de la rețea. Prin deplasarea lentă orizontală, într-un sens ori altul, a miezului M se găsește poziția pentru care ampermetrul A — ori un bec în locul lui — indică trecerea curentului de rezonanță I_r maxim.

ÎNTREBĂRI, EXERCIIII, PROBLEME

1. Să se facă o comparație între reprezentarea curentului alternativ prin fazori și cea prin sinusoidale.
2. Să se arate prin reprezentare grafică deosebirea dintre curent continuu, curent alternativ sinusoidal și curent alternativ, în general.
3. În ce caz o bobină reală produce o defazare de 90° a tensiunii înaintea intensității curentului alternativ?
4. De ce valoarea medie a unei mărimi sinusoidale (i sau u) pe o perioadă este nulă?
5. De ce puterea activă este nulă în circuitul numai cu inductanță sau numai cu capacitate ideală?
6. Să se arate de ce condensatorul întrerupe circuitul de curent continuu și închide pe cel de curent alternativ. Să se explice electronic aceste procese.
7. Cum se reprezintă în scheme o bobină reală L care conține și rezistență activă? Prezintă un avantaj această reprezentare?
8. Intensitatea unui curent alternativ este reprezentată prin ecuația:

$$i = 100 \sin \left(200 \pi t - \frac{\pi}{3} \right).$$

Se cer:

- a) Perioada și frecvența curentului.
- b) Valorile instantanee ale lui i pentru momentele 0 s, 0,152 s.
- c) Reprezentarea grafică a lui i în funcție de ωt .

Răspuns: 10^{-2} s; 10^2 Hz; $-86,5$ A; $20,8$ A.

9. Într-o bobină cu inductanța de 500 mH este un curent alternativ de 0,5 A, cu frecvența de 50 Hz. Care este tensiunea la bornele bobinei?

Răspuns: 78,5 V.

10. O bobină cu miez de fier, conectată la o tensiune continuă de 6 V este parcursă de 7,5 A. Conectată la o tensiune alternativă de 105 V, cu pulsația de $100 \pi s^{-1}$, este parcursă de 1,8 A.

Se cer:

- Impedanța bobinei.
- Inductanța bobinei.
- Defazajul dintre i și u la bornele ei.

Răspuns: 58,33 Ω ; 185 mH; 89°12'.

11. Într-o locuință sînt montate două lămpi electrice de 150 W fiecare, trei lămpi de cîte 75 W, două lămpi de cîte 25 W și două plite electrice de cîte 600 W. Tensiunea rețelei este de 120 V. Pentru ce curent trebuie calculate siguranțele, dacă el trebuie să depășească cu 35% valoarea reală a curentului de consum, cînd funcționează simultan toate aceste aparate?

Răspuns: ≈ 20 A.

12. Un cadru cu 150 de spire și secțiunea de 200 cm² se rotește cu 3 600 rot/min, în jurul unui ax, perpendicular pe liniile unui cîmp de inducție de 0,8 tesla. Se cer:
- t.e.m. efectivă indusă la bornele cadrului;
 - curentul în cadru, dacă circuitul său este închis printr-o rezistență de 100 Ω , cadrul avînd de asemenea 100 Ω .

Răspuns: 641,3 V; 3,2 A.

13. Într-un circuit de curent alternativ cu frecvența 50 Hz se află în serie un reostat și o bobină cu rezistența neglijabilă și inductanța de 100 mH. Se cer:
- Rezistența reostatului, știind că bobina produce un defazaj de 30° la bornele circuitului, între I și U .
 - Capacitatea ce ar trebui conectată în circuit pentru a înlătura defazajul.

Răspuns: 54,4 Ω ; 102 μ F.

14. Un circuit serie conectat la o tensiune alternativă de 10 V cu frecvența de 50 Hz este format dintr-o bobină, cu rezistența activă de 4 Ω și inductanța de $\frac{10}{\pi}$ mH, precum și o capacitate de $\frac{2,5 \cdot 10^3}{\pi}$ μ F. Se cer:

- Intensitatea curentului și diagrama fazorială a tensiunilor.
- Defazajul la bornele circuitului și la bornele bobinei.
- Tensiunea la bornele bobinei.
- Puterile în circuit.

Răspuns: 2 A; -36°50'; 14°; 8,24 V; 16 W; 12 var; 20 VA.

15. Un circuit format dintr-un condensator cu capacitatea de 100 μ F legat în serie cu o bobină care are rezistența de 2 Ω și inductanța de 101,4 mH este alimentat la o tensiune de 110 V cu 50 Hz. Se cer:
- Intensitatea în circuit.
 - Triunghiul tensiunilor și triunghiul rezistențelor.
 - Tensiunile de la bornele bobinei, respectiv condensatorului.
- Ce se poate spune despre acest circuit?

Răspuns: 55 A; 1 751 V; 1 751 V.

16. Un circuit de curent alternativ este compus dintr-o bobină cu rezistența activă de 2 Ω și reactanța inductivă de 170 Ω , legată în serie cu un condensator, care are reactanța capacitivă de 105 Ω . Este alimentat la o tensiune de 110 V cu frecvența 50 Hz. Se cer:
- Reactanța circuitului.
 - Intensitatea în circuit.
 - Inductanța bobinei și capacitatea condensatorului.

Răspuns: 65 Ω ; 1,69 A; 0,54 H; 30,3 μ F.

17. Un circuit este format dintr-un condensator de $\frac{2 \cdot 10^3}{\pi}$ μ F, legat în serie cu o bobină, care are rezistența activă de 4 Ω și inductanța de $\frac{20}{\pi}$ mH. Circuitul este alimentat

la o tensiune instantanee $U = 20 \sqrt{2} \sin 100\pi t$ volți. Bobina are 200 de spire și servește ca primar unui transformator cu 25 de spire la secundar. Se cer:

- Frecvența curentului de alimentare și perioada lui.
- Triunghiul impedanței și intensitatea în circuit.
- Tensiunea la bornele bobinei și cea la bornele condensatorului.
- Defazajul dintre I și U la bornele bobinei și cea de la bornele circuitului.
- Tensiunea la bornele secundarului transformatorului.

(Olimpiada de fizică, etapa republicană, 1965.)

Răspuns: 50 Hz; 0,02 s; 4 A; 8 $\sqrt{5}$ V; 20 V; 26°40'; -36°50'; $\sqrt{5}$ V.

18. Alimentată la o tensiune continuă de 100 V, o bobină este parcursă de 2,5 A, iar la o tensiune alternativă de 100 V și frecvența 50 Hz intensitatea este de 2 A. În serie cu bobina se conectează un condensator de $\frac{500}{3\pi}$ μ F, iar circuitul format se conectează

tot la tensiunea alternativă de 100 V. Se cer:

- Rezistența și inductanța bobinei.
- Intensitatea prin circuitul cu condensator.
- Tensiunea la bornele bobinei și diagrama fazorială a tensiunilor în cazul b.
- Defazajul la bornele bobinei, apoi la bornele circuitului, semnificația fizică a rezultatului.
- Valoarea capacității unui condensator, care ar produce rezonanța și valoarea curentului în acest caz.
- Puterea activă și cea reactivă în cazul b.

(Olimpiada de fizică, etapa republicană, 1966.)

Răspuns: 40 Ω ; $\frac{0,3}{\pi}$ H; 2 A; 100 V; 100 V; 36°50'; -36°50'; $\frac{10^3}{3\pi}$ μ F; 2,5 A; 160 W; 120 var.

19. O rezistență de 0,4 k Ω și o bobină cu $L = 20$ mH sînt conectate în paralel la tensiunea de 20 V, cu pulsația de $5 \cdot 10^3$ s⁻¹. Se cer:

- curenții prin ramuri și curentul total;
- unghiul de fază dintre I și U .

Răspuns: 50 mA; 0,2 A; 0,206 A; 76°.

20. O rezistență de 1 k Ω , o bobină de 0,2 mH și un condensator de 300 pF sînt conectate în paralel la o tensiune de 1 V cu frecvența de 250 kHz. Se cer:

- curenții în ramuri și curentul total;
- unghiul de fază dintre I și U .

Răspuns: 1 mA; 3,2 mA; 0,47 mA; 2,9 mA; 70°.

21. O bobină de 1 mH și rezistență neglijabilă este conectată în paralel cu un condensator de 40 μ F, la o tensiune alternativă de 2 V. Se cer:

- frecvența de rezonanță a curenților;
- curenții din ramuri.

Răspuns: $5 \cdot 10^3$ Hz; 0,4 A; 0,4 A

6. MAȘINI ELECTRICE ROTATIVE

A. MAȘINI DE CURENT ALTERNATIV

6.1. Clasificarea mașinilor electrice. *Mașinile care transformă energia mecanică în energie electrică se numesc generatoare electrice.* Mașinile care fac transformarea inversă poartă numele de *motoare electrice* sau *electromotoare*. Generatoarele și electromotoarele sînt *mașini electrice rotative*.

După felul curentului electric produs ori utilizat pentru funcționare, mașinile electrice pot fi de două feluri: *de curent alternativ* și *de curent continuu*. Mașinile de curent alternativ pot să fie sincrone sau asincrone.

6.2. Alcătuirea mașinilor electrice rotative. *Generatoarele electrice funcționează pe baza fenomenului de inducție electromagnetică, iar electromotoarele pe baza forței electromagnetice,* produsă de un cîmp magnetic asupra unui conductor, prin care circulă curent electric. Orice mașină electrică rotativă va avea, deci, două părți principale: una din ele produce cîmpul magnetic inductor și se numește *inductor*, iar cea de-a doua se numește *indus*; acesta constă din bobine cu miez de fier, în care se induce tensiunea electromotoare. Una din aceste două părți este fixă și se numește *stator*, cealaltă este mobilă și se numește *rotor*. De aceea, asemenea mașini se numesc mașini electrice rotative. În cazul mașinilor de curent alternativ în general indusul este stator, iar inductorul este rotor. La cele de curent continuu, inductorul este stator, iar indusul este rotor. Mașinile electrice rotative sînt de aceea de două feluri: cu cîmp magnetic $\vec{B}$ învîrtitor și cu indus fix sau mobil (pentru curent alternativ) sau cu cîmp magnetic $\vec{B}$ fix și cu indus rotativ (pentru curent continuu).

6.3. Principiul generatorului de curent alternativ monofazat (alternator). *La capetele unei spire care se rotește într-un cîmp magnetic ia naștere o tensiune electromotoare alternativă, cum s-a arătat la capitolul 5. Același fenomen se produce și în cazul cînd spira stă pe loc, iar cîmpul magnetic se rotește; acesta este cazul alternatorului. Principiul lui de funcționare se demonstrează prin următoarea experiență.*

Experiență. În apropierea unei bobine cu miez de fier (fig. 5.3) se rotește un magnet în formă de bară, în jurul unui ax orizontal. Instrumentul de măsurat indică existența în bobină a unui curent alternativ. Bobina limitează în fiecare moment un flux de inducție variabil, care induce în bobină o t.e.m. alternativă. În timp ce polul N al magnetului se apropie de bobină, curentul indus are, conform regulii lui Lenz, sensul indicat (fig. 5.3, *a*), ce creează un pol N la capătul dinspre magnet. Cînd polul N al magnetului se depărtează, sensul curentului se schimbă, inversîndu-se și polaritatea bobinei care se păstrează astfel și în intervalul de timp cît se apropie polul Sud al magnetului (fig. 5.3, *b*, *c*). La o rotație completă a magnetului, în spirală se produc două alternanțe, adică curentul produs efectuează o perioadă completă. Acul instrumentului oscilează, indicînd existența unui curent alternativ. Bobina repre-

zintă statorul-indus al generatorului, iar magnetul reprezintă rotorul-inductor al generatorului. Așadar, funcționarea alternatorului se bazează pe inducția electromagnetică produsă într-o bobină aflată într-un cîmp magnetic învîrtitor.

6.4. Construcția și funcționarea alternatorului. Partea mobilă — rotorul — este formată dintr-un număr de electromagneți, care alcătuiesc inductorul alternatorului. Inductorul generează fluxul magnetic necesar funcționării alternatorului. Polii electromagneților alternează ($N_1 S_1 N_2 S_2 \dots$) (fig. 6.1, *a*). Inductorul este alimentat cu curent continuu (curent de excitație) produs de un mic dinam G (excitator), montat chiar pe axul alternatorului. De la excitator curentul vine la două perii P_1 și P_2 , care fac contact alunecător cu două inele de cupru I_1 și I_2 , fixate pe axul rotorului, dar izolate de el și între ele. De inele sînt fixate capetele înfășurării electromagneților în R_1 și R_2 . Inductorul este pus în rotație de către un motor, care poate fi o turbină cu aburi, o turbină hidraulică, un motor Diesel etc.

Generatorul acționat de o turbină cu aburi se numește turbogenerator. Generatorul acționat de o turbină hidraulică poartă denumirea de hidrogenerator.

*Statorul — indusul — alternatorului este alcătuit dintr-o carcasă și un miez de oțel, în formă inelară, care poartă bobinajele, înfășurate ca în figura 6.1, *a*. Capetele bobinajelor sînt aduse la bornele $B_1 B_2$, de unde se poate lua curentul alternativ produs de generator. Funcționarea generatorului se poate urmări pe figura 6.1. Prin rotirea inductorului liniile de cîmp magnetic produse de polii săi taie conductoarele bobinajului din stator, în care induc tensiuni electromotoare. În situația schițată pe figura 6.1, *a*, polul N_1 se apropie de bobina A , S_1 se apropie de B , N_2 se apropie de C , iar S_2 se apropie de D , făcînd să crească fluxul în aceste bobinaje. Săgețile indică sensul curentului indus, care face borna B_2 pozitivă, iar borna B_1 negativă. În momentul cînd polii inductorului ajung exact în fața bobinajelor statorului, fluxul de inducție în bobinele indusului este maxim, iar t.e.m. indusă este nulă. Polii inductorului depășesc această poziție și ajung în situația din figura 6.1, *b*, cînd induc curent de sens contrar, care face borna B_1 pozitivă și borna B_2 negativă etc. Prin urmare, în indusul alternatorului ia naștere o tensiune alternativă.*

Notăm cu n turația rotorului în rot/min și cu p numărul perechilor de poli ai rotorului. Pentru fiecare pereche de poli ai rotorului care se apropie ori se depărtează, în una dintre bobine (deci concomitent și în celelalte) se desfășoară o perioadă completă. Cum în fiecare rotație prin dreptul bobinei trec p perechi de poli, iar într-o secundă $p \frac{n}{60}$ perechi de poli, urmează că în acest interval de timp se produc $p \frac{n}{60}$ perioade. Deci, $\nu = \frac{pn}{60}$ exprimată în Hz.

În țara noastră, ca și în toate țările europene, frecvența curentului alternativ industrial trebuie să fie de 50 Hz. Pentru un anumit număr de perechi de poli ai inductorului, acesta trebuie rotit cu o anumită viteză unghiulară, numită viteză de sincronism, ca să producă frecvența standard de 50 Hz.

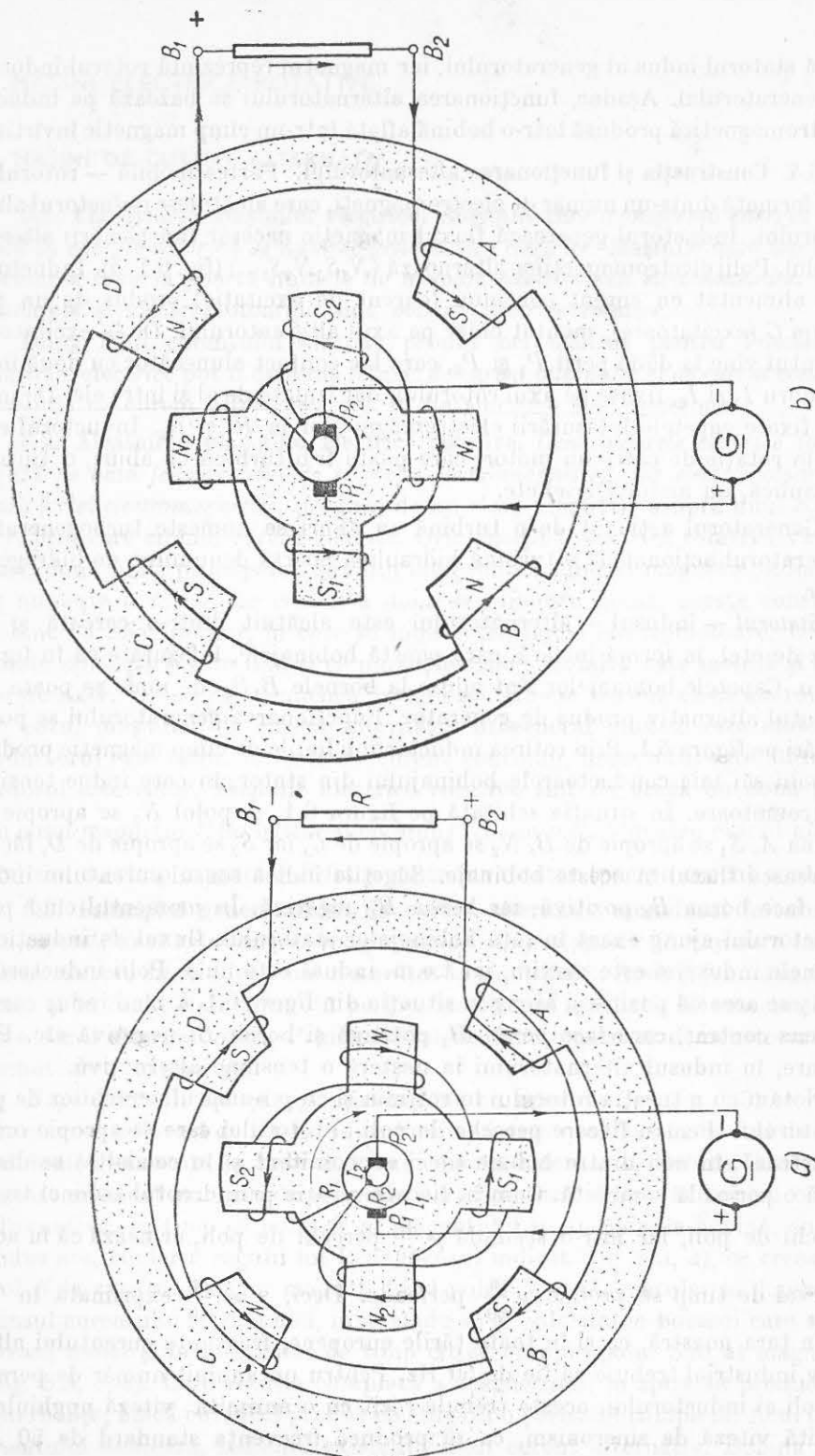


Fig. 6.1

De exemplu, un rotor cu patru perechi de poli trebuie să facă 750 rotații pe minut.

Curentul alternativ indus în bobinele statorului produce un câmp magnetic, care se învîrtește: este un câmp magnetic învîrtitor. El se rotește cu aceeași viteză cu care se rotește rotorul, deci cu aceeași viteză cu care se rotește câmpul magnetic al rotorului. Cele două cîmpuri magnetice sînt în sincronism. Alternatorul este un generator sincron.

6.5. Reversibilitatea mașinilor electrice rotative; motor sincron. Să analizăm mai amănunțit funcționarea unei mașini electrice rotative. Se prezintă două situații: 1) Câmpul magnetic constant $\vec{B}$ al inductorului se învîrtește și intersectează succesiv conductoarele indusului; 2) Câmpul magnetic constant $\vec{B}$ al inductorului poate fi fix, iar conductoarele indusului să se învîrtească și să intersecteze liniile acestui cîmp. Ambele fenomene sînt echivalente. Fie conductorul MN (fig. 6.2, a) care taie cîmpul $\vec{B}$ cu viteza $\vec{v}$. Electronii liberi din conductor sînt supuși unei forțe Lorentz, care-i deplasează spre capătul M , între capetele MN luînd astfel naștere o tensiune electromotoare e . Mașina funcționează ca generator și furnizează energie electrică. Pentru aceasta ea trebuie să absoarbă din exterior energie mecanică, adică rotorul să fie acționat de către un motor exterior.

Să deconectăm motorul care acționează rotorul și să introducem în conductoarele indusului de la o sursă exterioară (fig. 6.2, b) curent electric. Considerăm la un moment dat polaritatea din figură. Fiecare electron care se mișcă formînd curentul din conductor este supus unei forțe Lorentz ceea ce face ca acest conductor să fie acționat de o forță electromagnetică $\vec{F}$, care pune conductorul, deci rotorul, în mișcare. Mașina funcționează ca motor și furnizează energie mecanică. Pentru aceasta ea trebuie să absoarbă din exterior energie electrică, adică spirele indusului să fie alimentate de un generator electric

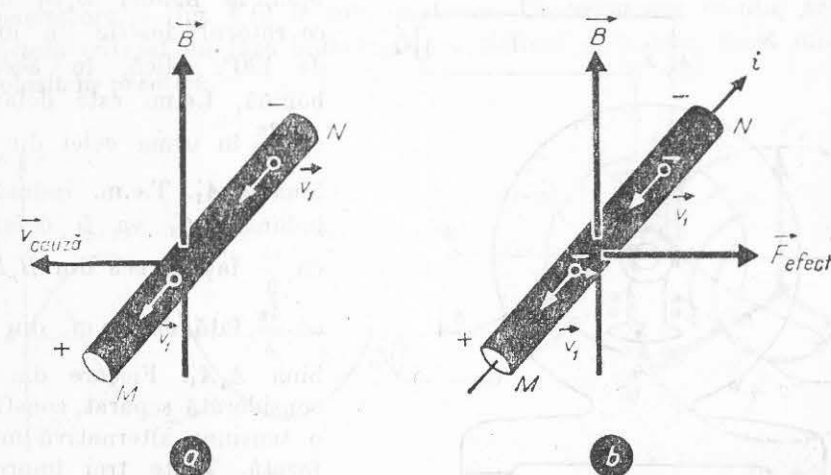


Fig. 6.2

exterior. Prin urmare, mașinile electrice rotative sînt reversibile; ele pot funcționa ca generator sau ca electromotor. Pentru ca alternatorul să funcționeze ca electromotor, se scoate rezistența de sarcină dintre bornele B_1B_2 (fig. 6.4) și se îndepărtează motorul care acționa rotorul. La bornele B_1B_2 se conectează o tensiune alternativă în opoziție cu cea produsă de alternator. Bobina A va respinge polul N_1 și va atrage polul S_1 , bobina B va respinge polul S_1 și va atrage polul N_2 etc., ceea ce va avea ca urmare rotirea rotorului în sens antiorar. Cînd polii rotorului ajung exact în fața bobinelor statorului se schimbă sensul tensiunii din stator, ceea ce are ca urmare continuarea mișcării rotorului. Este necesar strictul sincronism cu turația rotorului, deci frecvența de rotație a rotorului și frecvența curentului din stator să fie egale. Dacă această condiție de sincronism nu-i îndeplinită, electromotorul nu funcționează. De aceea se numește motor sincron. Motorul sincron nu pornește din repaus; trebuie mai întîi adus rotorul la viteza de sincronism printr-un mijloc oarecare, apoi el își continuă mișcarea. Acesta este cel mai important neajuns al motorului sincron. De aceea mașinile electrice sincrone sînt folosite mai ales ca generatoare. Ca motoare se folosesc mașinile asincrone, de curent trifazat.

6.6. Generator trifazat. Pe statorul inelar se fixează trei înfășurări identice $A_1A'_1$, $B_1B'_1$, $C_1C'_1$ (fig. 6.3), independente și montate la 120° una față de alta. Rotorul inductor NS este alimentat cu curent continuu la bornele B' și B'' . Înfășurările sînt reprezentate perpendicular pe planul figurii. Bornele lor A , B , C se numesc începutul fazelor, iar bornele X , Y , Z se numesc sfîrșitul fazelor. Prin fază, în acest caz, se înțelege unul din circuite. Rotorul este acționat de un motor exterior. Bobinele rotorului sînt excitate de un curent continuu prin periile P_1 și P_2 . Rotorul trece succesiv prin fața înfășurărilor în care induce t.e.m. alternative, de aceeași valoare maximă E_m . Aceste t.e.m. nu trec simultan prin valoarea maximă, deci nu sînt în aceeași fază una față de alta. T.e.m. indusă ajunge la valoarea maximă mai întîi în bobina $A_1A'_1$ (fig. 6.3),

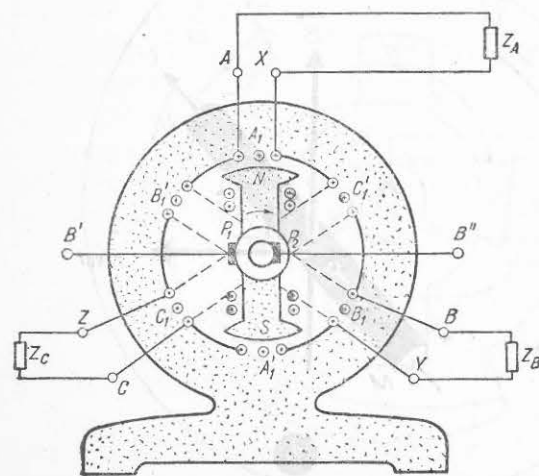


Fig. 6.3

apoi în bobina $B_1B'_1$ după ce rotorul descrie un unghi de 120° , adică, în această bobină, t.e.m. este defazată cu $\frac{2\pi}{3}$ în urma celei din bobina $A_1A'_1$. T.e.m. indusă în bobina $C_1C'_1$ va fi defazată cu $\frac{2\pi}{3}$ față de cea din $B_1B'_1$ și cu $\frac{4\pi}{3}$ față de t.e.m. din bobina $A_1A'_1$. Fiecare din ele, considerată separat, constituie o tensiune alternativă monofazată. Toate trei împreună constituie un sistem trifazat.

Așadar:

Sistemul format din trei circuite electrice de curent alternativ cu aceeași frecvență, ale cărui t.e.m. sînt defazate între ele cu $1/3$ de perioadă ($2\frac{\pi}{3}$ radiani), se numește sistem trifazat.

Dacă cele trei t.e.m. au valorile maxime egale, sistemul trifazat se numește simetric.

T.e.m. ale celor trei faze se pot exprima analitic prin expresiile:

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$e_C = E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

Ca origine a timpului se consideră momentul cînd t.e.m. din înfășurarea primei faze AX trece prin valoarea zero.

Reprezentarea grafică a acestor 3 t.e.m. va fi un ansamblu de trei sinusoide, defazate cu $2\pi/3$ una față de alta (fig. 6.4).

Cele trei t.e.m. se pot reprezenta mult mai simplu prin fazori (fig. 6.5). Fazorul E_A reprezintă modulul tensiunii maxime din înfășurarea AX , avînd unghiul ce reprezintă faza inițială, nul.

Fazorul E_B reprezintă modulul tensiunii maxime din înfășurarea BY , defazată în urmă cu unghiul $\frac{2\pi}{3}$; analog fazorul E_C este defazat în urmă cu unghiul $\frac{4\pi}{3}$ față de E_A .

Fiecare înfășurare a generatorului trifazat poate fi considerată o sursă electrică separată și poate alimenta un consumator, I, II sau III. În acest caz sînt necesare șase conductoare pentru a conduce curentul de la înfășurările generatorului (fig. 6.6) la consumatoare. Un asemenea montaj se numește sistem trifazat cu faze independente. Nefiind economic, acest montaj nu-i folosit în practică.

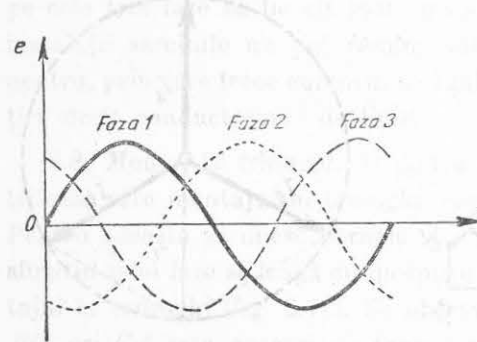


Fig. 6.4

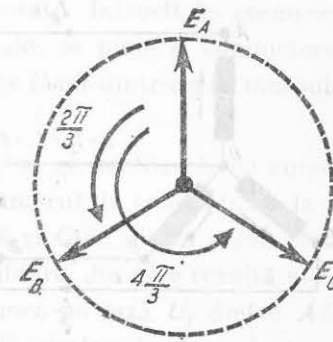


Fig. 6.5

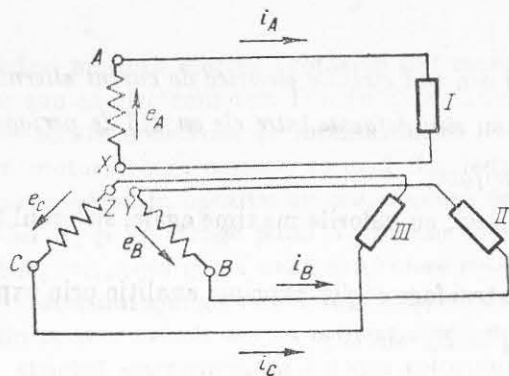


Fig. 6.6

6.7. Montaj în stea. În acest montaj, sfârșitul fazelor X, Y, Z se unesc într-un punct numit punct neutru sau nul. Punctul neutru al generatorului se unește cu punctul neutru al consumatoarelor, legate ca în figura 6.7, printr-un conductor numit *fir neutru*. Începutul fazelor A, B, C se leagă cu consumatoarele A', B', C' prin conductoare numite *conductoare de linie*. Dacă cele trei consumatoare sînt identice, sistemul trifazat este echilibrat. În acest caz, valorile maxime ale celor trei curenți sînt egale $I_A = I_B = I_C$, iar suma fazorilor lor este nulă în fiecare moment $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$.

Acest lucru se poate demonstra cu ajutorul reprezentării prin fazori (fig. 6.8). I_A, I_B, I_C reprezintă intensitățile la un moment dat. $I_B + I_C$ se adună vectorial și dau rezultanta $I_1 = -I_A$. Această rezultantă adunată cu I_A va da suma nulă, cum s-a spus mai înainte. Din această cauză curentul din firul neutru este nul, iar acest fir poate lipsi. Punctul neutru al generatorului O (fig. 6.7) și O' al consumatoarelor se pun la pămînt. Se transmite astfel energia electrică de la generatorul trifazat la consumatoare numai prin trei conductoare, ceea ce reprezintă mare economie de material conductor.

Tensiunile dintre începutul fazelor A, B ori C și punctul neutru se numesc *tensiuni pe fază* U_f . Tensiunea pe fază reprezintă tensiunea dintre un conductor de linie și firul neutru sau pămînt. Tensiunile dintre începutul a două faze,

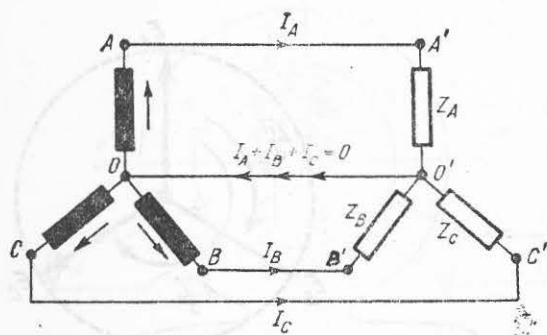


Fig. 6.7

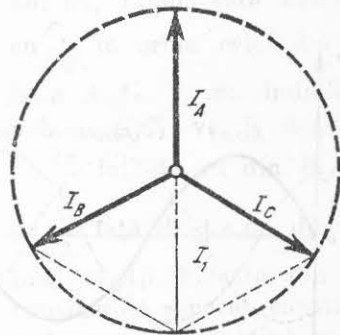


Fig. 6.8

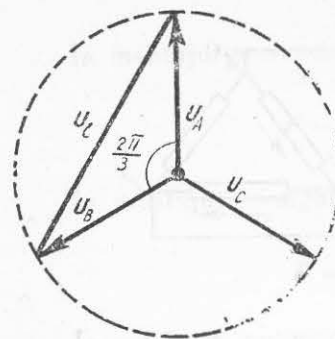


Fig. 6.9

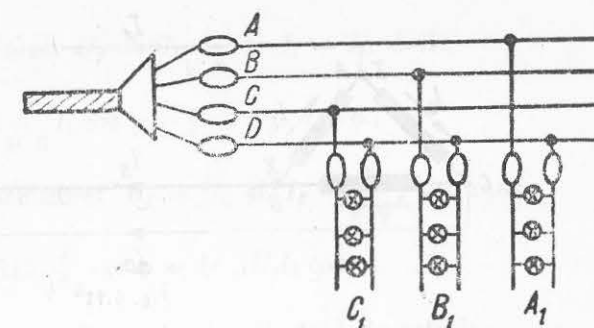


Fig. 6.10

adică dintre A și B, dintre B, C și dintre C, A se numesc *tensiuni de linie* U_l . Tensiunea de linie este de fapt o tensiune între faze și reprezintă tensiunea dintre două conductoare de linie. Tensiunea de linie U_l între punctele A și B este egală cu diferența dintre tensiunile pe fază U_A și U_B , fiecare egală cu U_f , dar decalate cu $\frac{2\pi}{3}$ una față de alta. Reprezentarea prin fazori a tensiunilor pe fază (fig. 6.9) U_A și U_B dă tensiunea de linie U_l ca diferență vectorială: $U_l^2 = U_f^2 + U_f^2 - 2U_f^2 \cos \frac{2\pi}{3} = 2U_f^2 + 2U_f^2 \cos \frac{\pi}{3} = 2U_f^2 + U_f^2 = 3U_f^2$; rezultă că:

$$U_l = \sqrt{3} U_f \quad (1)$$

adică la montajul în stea tensiunea de linie este egală cu $\sqrt{3} U_f$ iar curentul de linie este egal cu curentul pe fază.

Partea a doua a concluziei precedente reiese din figura 6.7, unde se observă că înfășurarea fazei este în serie cu conductorul de linie. Rețeaua de iluminat are tensiunea pe fază $U_f = 220$ V. Tensiunea de linie U_l va fi deci $U_l = \sqrt{3} \cdot 220 = 1,73 \cdot 220 = 380,6$ V. Montajul în stea este utilizat mai ales la instalațiile electrice de iluminat interior (fig. 6.10) al clădirilor. Se caută ca sarcina pe cele trei faze să fie cit mai apropiată de egalitate. Întrucît în asemenea instalații sarcinile nu pot rămîne tot timpul egale, se pune și conductorul neutru, prin care trece curentul de egalizare. El este făcut dintr-un fir mai subțire decît conductoarele de linie.

6.8. Montaj în triunghi. Al doilea montaj pentru generatoarele de curent trifazat este montajul în triunghi, care reduce numărul de conductoare la 3. Pentru aceasta se unesc bornele A cu Z, B cu X și C cu Y. În acest mod, sfârșitul unei faze se leagă cu începutul fazei următoare, din care rezultă montajul în triunghi (fig. 6.11). Se observă că tensiunea pe fază U_f dintre AB, BC, ori CA este aceeași cu tensiunea de linie U_l , dintre două conductoare

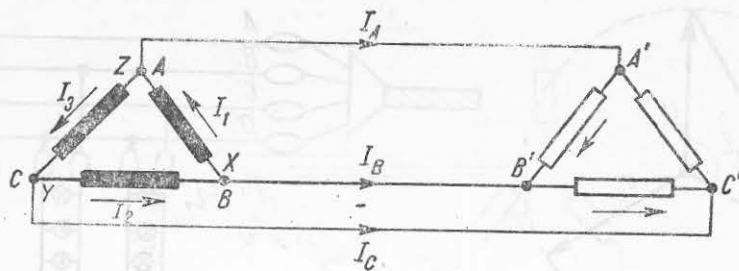


Fig. 6.11

de linie AA' și BB' , BB' și CC' ori CC' și AA' . Deci $U_f = U_l$. În fiecare vîrf, de exemplu BX se ramifică trei curenți I_1 , I_2 în faze (înfășurările generatorului) și $I_B = I_l$ în linie.

Potrivit legii întii a lui Kirchhoff, aplicată unui vîrf (nod) și ținînd seamă de defazări, se poate scrie: $I_l = I_2 - I_1$. Diferența se poate face cu ajutorul diagramei fazoriale (fig. 6.12):

$$I_l^2 = I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2 \cos \frac{2\pi}{3}.$$

Dar $I_1 = I_2 = I_f$, ca modul, iar $\cos \frac{2\pi}{3} = -\cos \frac{\pi}{3} = -\frac{1}{2}$, deci:

$$I_l = \sqrt{3}I_f. \quad (2)$$

Așadar:

La montajul în triunghi tensiunea de linie este egală cu tensiunea pe fază $U_l = U_f$, iar curentul de linie este egal cu curentul de fază înmulțit cu $\sqrt{3}$ adică $I_l = I_f \sqrt{3}$.

Conectarea consumatoarelor se poate face, de asemenea, în stea ori în triunghi, după condițiile locale, independent de montajul generatorului. Când sistemul trifazat nu este echilibrat, calculele devin mai complicate, dar ele nu intră în preocupările noastre, fiind probleme de electrotehnică.

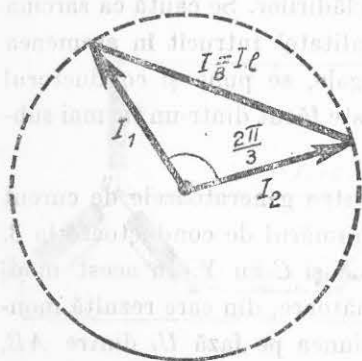


Fig. 6.12

6.9. Puterea și energia în curent trifazat. Puterea în curent alternativ monofazat este dată (§5.10) de relația $P = UI \cos \varphi$, unde φ este defazajul dintre tensiune și intensitate. Legea conservării energiei cere ca puterea medie a sistemului trifazat să fie egală cu suma puterilor medii ale fiecărei faze, adică $P = 3UI \cos \varphi$, U și I fiind tensiunea și intensitatea pe fază.

În montajul stea echilibrat $U_f = U_l \frac{1}{\sqrt{3}}$ și $I_f = I_l$, deci:

$$P = 3 \frac{U_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi.$$

În montajul triunghi echilibrat $U_f = U_l$ și $I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$, de unde:

$$P = 3 U_l \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi.$$

În concluzie, puterea sistemului trifazat este dată de relația:

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

independent de montajul generatorului. S-a exprimat puterea în funcție de U_l și I_l , deoarece numai aceste mărimi sînt accesibile măsurării într-un punct oarecare al liniei. Ca și la curentul monofazat puterea activă se măsoară în watt, iar puterea aparentă $P_a = \sqrt{3} U_l I_l$ se măsoară în unitatea numită volt-ampere, VA. Puterea reactivă $P_r = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi$ și se măsoară în unitatea numită var (volt-ampere reactiv).

Energia se va calcula cu ajutorul cunoscutei formule:

$W = Pt = \sqrt{3} U_l I_l t \cos \varphi$ și se va măsura în joule sau se va transforma în kWh.

6.10. Motor asincron. Cele mai răspîndite motoare electrice sînt motoarele asincrone, trifazate. Ele se folosesc în întreprinderile din toate ramurile industriale, fiind motoare de acționare a tot felul de mașini. Ca orice mașină rotativă se compune din două părți: statorul și rotorul. Statorul este format dintr-o carcasă cilindrică făcută din tole de oțel. Pe fața lui interioară sînt fixate bobinele inductoare, avînd conductoarele paralele cu axul. În aceste conductoare circulă curentul trifazat de excitație primit de la o rețea trifazată. Curentul trifazat de excitație generează cîmp magnetic învîrtitor, care se rotește cu viteză unghiulară constantă. Cele trei bobinaje ale statorului se pot lega în stea sau în triunghi, cum s-a văzut înainte.

Rotorul este un cilindru din tole de fier, avînd la margine creștături de-a lungul generatoarelor. În ele se află conductoare de cupru, avînd capetele unite prin inele metalice, formînd un rotor în scurtcircuit numit „colivie de veveriță” (fig. 6.13). Liniile cîmpului învîrtitor produs de stator induc în conductoarele rotorului t.e.m. care vor produce curenți electrici. Acțiunea reciprocă dintre curentul din conductorul rotorului și cîmpul magnetic învîrtitor va produce forțe electromagnetice. Acestea vor da naștere unui cuplu de forțe, care va roti rotorul în sensul de rotație a cîmpului învîrtitor. Energia electrică

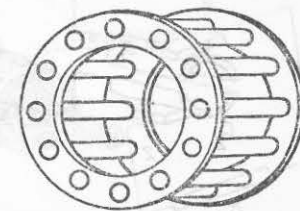


Fig. 6.13

se transformă în energie mecanică. Viteza de rotație a rotorului este mai mică decât viteza de rotație a cîmpului învîrtitor din stator. De aceea, motorul se numește motor asincron. Viteza de rotație a rotorului nu poate ajunge niciodată la viteza de rotație a cîmpului magnetic învîrtitor (numită și viteză de sincronism), deoarece în acest caz liniile cîmpului magnetic învîrtitor nu ar mai tăia conductoarele statorului și nu s-ar mai induce t.e.m. în rotor, adică motorul n-ar funcționa. Dacă viteza de rotație a rotorului scade, va crește viteza relativă a conductoarelor rotorului față de cîmpul învîrtitor, crește t.e.m. indusă, deci curentul din rotor, ceea ce are ca urmare creșterea vitezei rotorului la valoarea de regim. Motorul asincron are construcție foarte simplă, pornește singur din repaus și nu are contacte alunecătoare, care să producă scînteii; din aceste cauze motorul asincron are o foarte largă întrebuințare în practică, la acționarea diferitelor mașini și unelte.

B. MAȘINI DE CURENT CONTINUU

6.11. Principiul generatorului de curent continuu. Într-o spiră care se rotește într-un cîmp magnetic ia naștere o tensiune electromotoare alternativă (§ 5.1). Dacă cele două capete ale spirei sînt legate la cite un inel, pe care apasă cite o perie, pusă în legătură cu un circuit exterior, prin acesta va circula curent alternativ.

Problema care se pune este de a face ca în circuitul exterior să circule un curent în același sens, adică de a redresa curentul alternativ din spira rotitoare. Pentru aceasta se înlocuiesc cele două inele prin unul singur, secționat în două jumătăți C_1 și C_2 izolate una de alta (fig. 6.14). Aceste jumătăți de inel se numesc lamele colectoare, iar împreună formează colectorul. Pe colector se sprijină periile P_1 și P_2 . Periile sînt fixe și solidare cu circuitul exterior; lamelele sînt legate de capetele spirei rotitoare S . Colectorul are rolul de redresor mecanic cum se poate observa, urmărind procesele ce se produc la rotirea completă a unei spire cu colector (fig. 6.15). În prima poziție a spirei (fig. 6.15, *a*) conductoarele care formează spira nu taie liniile cîmpului și în spiră nu se induce t.e.m. În poziția *b* cele două conductoare taie un număr maxim de linii de cîmp în unitatea de timp, deci în spiră se induce o t.e.m. maximă E_m , care are sensul înspre lamela C_1 și dinspre lamela C_2 . Lamela C_1 se află sub peria P_2 ,

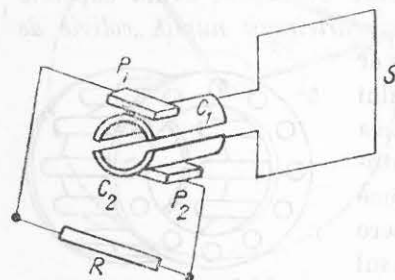


Fig. 6.14

de unde curentul trece, prin rezistența exterioară, la peria P_1 . Când spira ajunge în poziția *c*, t.e.m. indusă este nulă. În poziția *d*, t.e.m. indusă este maximă E_m și are sensul către lamela C_2 , adică în spiră curentul are sensul opus aceluia din spiră din poziția *b*. Lamela C_2 a ajuns însă sub peria P_2 , deci prin rezistorul exterior R , curentul circulează tot de la peria P_2 către P_1 .

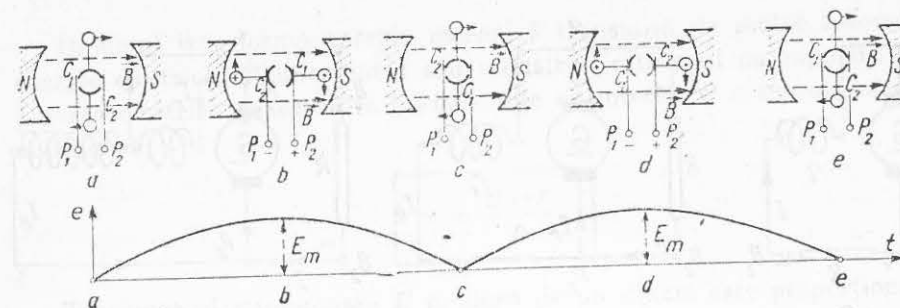


Fig. 6.15

Prin circuitul exterior circulă un curent continuu pulsant (cum se vede în graficul din figura 6.15) în timp ce în spirală ia naștere curent alternativ. Colectorul joacă rol de redresor mecanic.

6.12. Construcția și funcționarea mașinilor de curent continuu. Orice mașină de curent continuu (generator sau motor) are trei părți principale: inductor (*a*), indus și colector (*b*) (fig. 6.16).

Inductorul este stator și este format din una sau mai multe perechi p de poli, fixate pe carcasa mașinii (fig. 6.16, *a*). Polii sînt formați din electromagneți, prin înfășurarea cărora trece curentul de excitație. Inductorul produce fluxul magnetic inductor. Excitația inductorului poate fi de două feluri: *excitația independentă*, atunci cînd curentul de excitație este furnizat de o sursă separată de energie electrică sau *excitație proprie (autoexcitație)*, cînd curentul de excitație este furnizat chiar de generatorul însuși.

Sînt trei feluri de excitație proprie: *în serie*, cînd întregul curent produs de mașină trece prin circuitul de excitație (fig. 6.17, *a*) legat în serie cu indusul; *în derivație* sau *șunt*, cînd circuitul de excitație (fig. 6.17, *b*) este legat în paralel cu indusul, deci numai o parte mică din curentul generat în indus trece prin circuitul de excitație; *mixtă* sau *compound*, cînd are ambele feluri de excitație (fig. 6.17, *c*). Dinamul cu autoexcitație serie are înfășurările electromagneților (în scheme am reprezentat numai unul din poli) din sîrmă groasă și spire puține, deoarece prin ele circulă curentul total generat. La autoexcitația

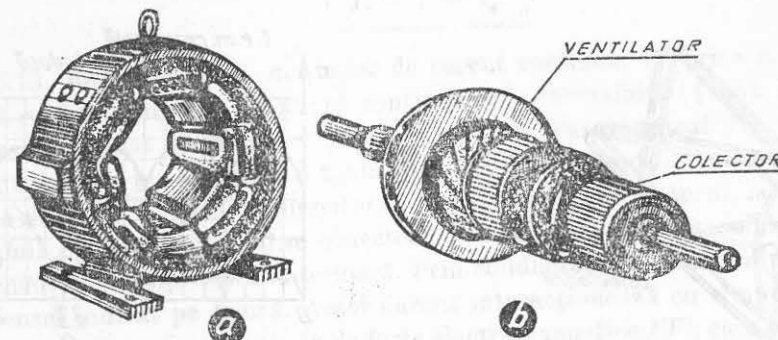


Fig. 6.16

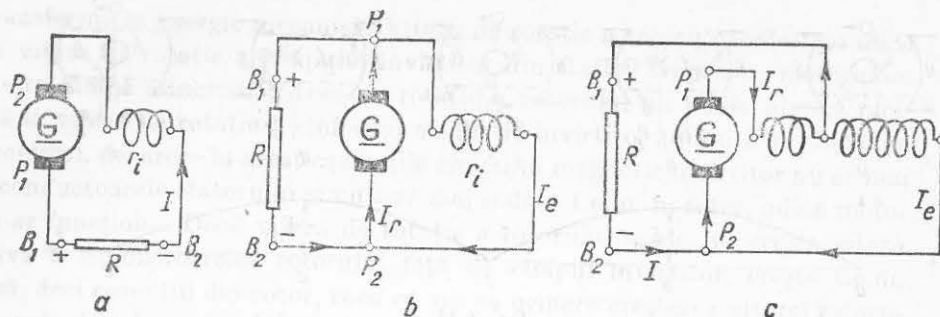


Fig. 6.17

sunt înfășurările electromagneților au spire multe din sîrmă subțire, ca să circule prin ei curenți slabi.

Indusul este rotor (fig. 6.16, b) și are forma unui cilindru făcut din tole subțiri de oțel, izolate între ele, pentru a împiedica formarea curenților turbionari. Pe suprafața cilindrică a rotorului cilindric (tobă) se fac niște creștături de-a lungul generatoarelor, în care se așază conductoarele care formează înfășurarea indusului. În aceste conductoare ia naștere t.e.m. indusă. Înfășurarea indusului este legată la colector. Rotorul este pus în mișcare de rotație de către un motor exterior, de exemplu, motor Diesel sau o turbină.

Colectorul (fig. 6.16, b) se așază pe același ax cu rotorul (indusul) și este format din mai multe lamele colectoare din cupru, izolate una de alta. Pe lamele, diametral opuse, calea periile făcute din cărbune, grafit sau cupru. Ele sînt fixate de portperii, care la rîndul lor sînt fixate de carcasă. Periile culeg curentul din bobine, prin lamelele colectoare. O bobină cu două lamele produce un curent pulsant (fig. 6.15). Acest curent pulsant are mereu același sens, dar variază între zero și valoarea maximă, ceea ce nu-l face propriu utilizării practice. De aceea, pe rotor se înfășoară multe bobine — în figura 6.18 sînt două — legate de multe lamele colectoare, așa fel încît la o rotație completă se produc multe t.e.m. în impulsuri defazate între ele. Periile culeg și dau la bornele mașinii în fiecare moment o t.e.m. rezultantă, practic continuă (fig. 6.19).

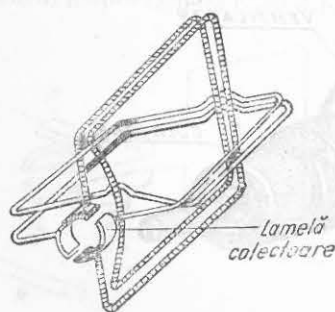


Fig. 6.18

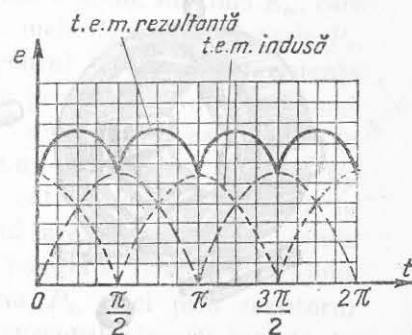


Fig. 6.19

Dinamul transformă energia mecanică transmisă de motor rotorului în energie electrică. Randamentul său industrial este egal cu raportul dintre puterea electrică generată la bornele sale și puterea P a motorului care îl acționează:

$$\eta = \frac{U_B \cdot I}{P} \quad (1)$$

Tensiunea electromotoare E produsă de un dinam este proporțională cu numărul de spire N ale rotorului, cu valoarea Φ a fluxului magnetic produs de inductor și cu numărul de rotații pe secundă ale rotorului:

$$E = KN\Phi\omega, \quad (2)$$

unde K este un coeficient care depinde de construcția mașinii. Din această t.e.m., o parte acoperă căderile interioare de tensiune și restul ajunge la borne, ca tensiune la borne U_B ori simplu U . În cazul dinamului serie (fig. 6.17, a) tensiune la borne va fi:

$$U = E - (r + r_i)I, \quad (3)$$

în care r reprezintă rezistența rotorului, r_i rezistența înfășurării electromagneților inductorului, iar I este intensitatea curentului din consumatorul R . În cazul dinamului șunt (fig. 6.17, b) tensiunea la borne va fi în același timp și tensiunea la perii și cădere de tensiune pe înfășurările inductorului:

$$U = E - rI_r = r_iI_e, \quad (4)$$

unde s-a notat prin I_r curentul din rotor și prin I_e curentul din electromagneții inductorului. Se observă ușor că la peria P_2 sau P_1 (fig. 6.17, b) legea I a lui Kirchhoff dă:

$$I_r = I + I_e \quad (5)$$

6.13. Reversibilitatea mașinilor de curent continuu. Ca orice mașină electrică rotativă, mașina de curent continuu este reversibilă (§ 6.5). Dacă rotorul este acționat de un motor și este învîrtit în sensul indicat (fig. 6.20, a) în conductoarele lui se induce o t.e.m. care produce curentul continuu cu sensul de la B_1 către B_2 prin consumatorul R . Se decuplează motorul, iar la bornele mașinii B_1B_2 (fig. 6.20, b) se conectează un generator G de tensiune continuă U , menținînd polaritatea anterioară. Prin conductoarele rotorului trece curent în sensul indicat pe figură. Acest curent interacționează cu cîmpul magnetic inductor și ia naștere un cuplu de forțe electromagnetice FF' , care pune rotorul în mișcare de rotație: mașina electrică funcționează ca motor. Tensiunea U

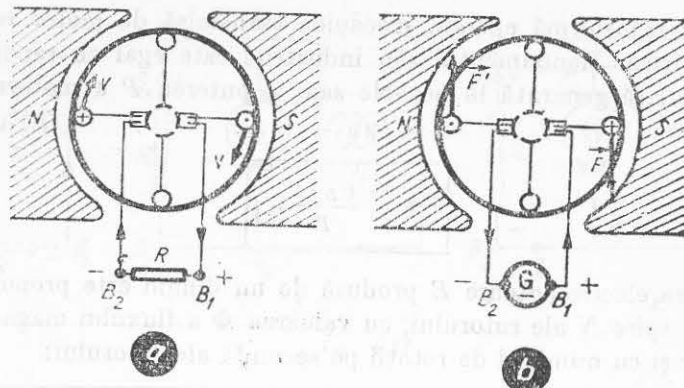


Fig. 6.20

aplicată la borne trebuie să echilibreze căderea interioară de tensiune rI și tensiunea contraelectromotoare E_c din rotor. Tensiunile contraelectromotoare E_c iau naștere în conductoarele rotorului, care taie liniile cimpului magnetic inductor. Așadar:

$$U = E_c + rI, \quad (6)$$

unde s-a notat prin r rezistența interioară a mașinii electrice.

6.14. Motorul de curent continuu. Este alimentat la o rețea de curent continuu, cu o tensiune egală cu tensiunea pe care ar genera-o, dacă ar funcționa ca generator. Pentru a inversa sensul de rotație a electromotorului se inversează sensul curentului de excitație. La pornire, tensiunea contraelectromotoare E_c este nulă, de aceea curentul de pornire I_p va fi:

$$I_p = \frac{U}{r},$$

cam de 10 ori mai mare decât valoarea lui normală, deoarece r este foarte mică. Pentru a evita deteriorarea înfășurărilor de către un asemenea curent intens, se leagă în serie cu indusul un reostat de pornire, de rezistență R_p (fig. 6.21). Inițial cursorul C este la capătul A , adică în circuit este introdusă toată rezistența reostatului, deci

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

Turația motorului crește, deci crește și E_c și în consecință rezistența reostatului este micșorată pînă la anulare, prin deplasarea cursorului către B . Ca și generatoarele, motoarele de curent continuu pot fi cu excitație serie, șunt sau mixtă. Motoarele serie

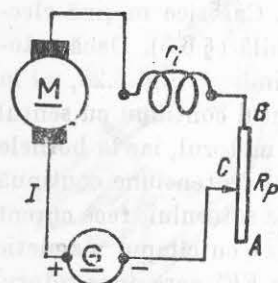


Fig. 6.21

au turație variabilă, de aceea sînt utilizate la tracțiunea electrică: motoare de tramvaie, troleibuze, locomotive sau la instalații de ridicat (macarale). Motoarele șunt au turație constantă, de aceea sînt folosite la pompe, ventilatoare, mașini-unelte etc.

ÎNTREBĂRI, EXERCIȚII, PROBLEME

1. Care este principiul unui alternator?
2. În ce constă sincronismul mașinilor electrice?
3. Să se compare montajul stea cu montajul triunghi.
4. În ce constă cimpul învîrtitor?
5. Să se compare motorul sincron cu motorul asincron.
6. Să se explice cum apare curentul continuu în circuitul exterior, în timp ce în înfășurarea dinamului ia naștere curent alternativ.
7. Să se explice cum se obține curent continuu cu pulsații foarte mici.
8. Să se explice autoexcitația mașinilor de curent continuu.
9. Rotorul unui generator de curent alternativ face 375 rot/min, iar generatorul are opt perechi de poli. Se cer frecvența și perioada t.e.m. generate?
10. Un generator cu 12 perechi de poli trebuie să genereze un curent cu frecvența de 50 Hz. Care este turația rotorului său?
11. Un dinam cu excitația-serie produce un curent de 10 A, cu t.e.m. de 200 V. Rotorul are rezistența de 5 Ω , iar inductorul de 6 Ω . Se cer tensiunea la perii și tensiunea la borne.
12. Rotorul unui dinam șunt produce o t.e.m. de 120 V, iar intensitatea în circuitul exterior este de 30 A; intensitatea în inductor este de 1,5 A, iar rotorul are rezistența de 0,2 Ω . Se cer: tensiunea la borne și rezistența inductorului.
13. Un dinam șunt furnizează un curent de sarcină de 48 A, sub tensiunea de 115 V. Rezistența indusului este de 0,16 Ω , iar curentul de excitație are 2 A. Se cer t.e.m. a generatorului și rezistența inductorului.
14. Un motor electric are rezistența inductorului și a rotorului de 0,7 Ω , tensiunea la borne de 200 V, iar curentul de alimentare are 32 A. Se cere t.c.e.m.
15. Un motor electric are tensiunea la borne de 120 V, iar t.c.e.m. de 100 V. Care este randamentul său electric?
16. Un motor de 5,4 kW și 220 V are rezistența rotorului de 0,6 Ω și randamentul electric 90%. Se cer: curentul absorbit în funcționarea normală, t.c.e.m., rezistența reostatului de pornire pentru ca la pornire curentul să fie de 40 A.

Răspuns: 50 Hz; 0,02 s.

Răspuns: 250 rot/min.

Răspuns: 150 V; 90 V.

Răspuns: 113,7 V; 75,8 Ω .

Răspuns: 123 V; 57,5 Ω .

Răspuns: 177,6 V.

Răspuns: 83.

Răspuns: 27,2; A 203,7 V; 4,9 Ω .

7. TRANSFORMATOARE

7.1. Principiul transformatorului. O problemă importantă a electrotehnicii este transportul economic al energiei electrice de la locul de producere la consumatori, pe distanțe mari. Pentru o anumită putere electrică de transportat ($P = UI$), randamentul este cu atât mai mare cu cât U este mai mare și ca urmare, I mai mic. În centralele electrice tensiunea produsă de alternatoare are 6 000 V. Transportul economic necesită 60 ... 200 kV. La locul de consumare însă, energia electrică trebuie să aibă o tensiune joasă, pentru a nu fi periculoasă utilizarea ei curentă. Este necesară deci transformarea energiei electrice de o anumită tensiune în energie electrică de altă tensiune. Această problemă se rezolvă simplu și economic numai la curentul alternativ, cu ajutorul transformatorului. Acesta este un aparat electromagnet static, care transformă elementele puterii U și I pe baza fenomenului de inducție electromagnetice. O experiență simplă ne demonstrează principiul transformatorului. Pe un miez de fier cu circuit magnetic închis (fig. 7.1) se așază două bobine de câte 600 spire. Prima bobină L_1 este conectată la un sistem punte, alimentat la o tensiune continuă de la un acumulator de 6 ... 8 V. Sistemul punte este format din două reostate, cu cursor R_1 și R_2 , având cursoarele C_1 și C_2 așezate la mijlocul fiecărui reostat. Bobina L_1 care primește energia se numește bobină primară; bobina L_2 care furnizează energie se numește bobină secundară. Cursorul C_1 rămânând fix la mijlocul lui R_1 , cursorul C_2 este mișcat alternativ, de o parte și de alta a mijlocului lui R_2 : tensiunea alternativă produsă la bornele lui L_2 se transmite prin inducție electromagnetice în secundar L_1 și acționează acul indicator al voltmetrului V_2 . Așezând cele două voltmetre V_1 și V_2 alături se observă și un defazaj de 180° între tensiunile din primar și secundar. Experiența sa repetă apoi, obținând rezultate mai convingătoare cu o tensiune alternativă de 4 V, conectată la bornele 1—2 îndepărtând sistemul în punte.

7.2. Construcția și funcționarea transformatorului monofazat. Transformatorul este un aparat electric static format din două bobine — primară și secundară. Acestea sînt așezate pe același miez divizat, din fier și siliciu, pentru

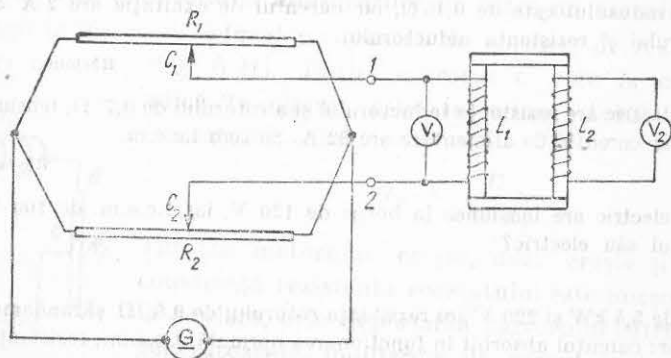


Fig. 7.1

a micșora pierderile prin curenți turbionari și prin histerezis. Cele două bobine sînt deci cuplate prin cîmpul de inducție magnetică ce se produce în miezul de fier și siliciu.

Tensiunea alternativă U_1 aplicată bobinei primare (fig. 7.2) produce în aceasta un curent alternativ, care, la rîndul său, generează în miez un flux de inducție magnetică*, de asemenea alternativ, avînd valoarea instantanee Φ . Acest flux variabil induce în bobina secundară o t.e.m. e_2 . El induce totodată și în primar o t.e.m. autoindusă e_1 , defazată cu unghiul π în urma lui U_1 :

$$e_1 = -U_1.$$

T.e.m. indusă în bobina secundară e_2 este în fază cu e_1 , deci defazată cu unghiul π în urma lui U_1 . Acest lucru se poate demonstra cu experiența lui Thomson (§4.3), inelul de aluminiu fiind secundarul, format dintr-o singură spirală. Azvîrlirea inelului dovedește că în secundar și primar curenții sînt de sens contrar. Dacă circuitul secundar este deschis — este fără consumator la bornele secundarului — se spune că transformatorul funcționează în gol. În acest caz $I_2 = 0$, în circuitul secundar nu se produce cădere interioară de tensiune și $e_2 = U_2$ și în fază cu aceasta.

Variația fluxului de inducție Φ induce într-o spirală o tensiune $e = -\frac{d\Phi}{dt}$.

În cele N_1 spire ale primarului va induce tensiunea:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -U_1,$$

iar în secundar:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = U_2.$$

Prin împărțire:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = -\frac{U_1^{**}}{U_2}.$$

Așadar, în valoare absolută:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K.}$$

- La mersul în gol al transformatorului, tensiunile sînt proporționale cu numărul de spire al bobinelor respective.

* Fluxul de inducție este practic în întregime concentrat în interiorul miezului. Se realizează un cuplaj maxim.

** Semnul minus arată că tensiunile electromotoare e_1 și e_2 sînt în opoziție de fază.

Raportul K se numește raport de transformare. Când $K > 1$, $U_2 < U_1$, transformatorul se numește coboritor de tensiune. Transformatorul furnizează aceeași putere electrică, curentul având aceeași frecvență, dar cu o tensiune mai mică decât cea primită de la rețea. Când $K < 1$, $U_2 > U_1$, transformatorul este ridicător de tensiune. Când $K = 1$, $U_2 = U_1$, iar transformatorul servește la separarea electrică a circuitelor, ele rămânând cuplate inductiv, adică prin cîmp magnetic.

Dacă circuitul secundar este închis printr-un rezistor consumator, de rezistență R_2 , în secundar apare I_2 . În acest caz $U_2 \approx e_2$, deoarece se produce cădere de tensiune în secundar. Abaterea este mică, pierderile sînt mici, încît randamentul transformatorului este de 95–98%. Se poate deci practic considera că puterea din primar P_1 și cea din secundar P_2 sînt egale:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2$$

de unde:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Pierderile de energie în transformator provin mai întîi din fenomenul de histerezis, prin care se transformă energie electrică în energie termică la inversarea magnetizării; apoi prin curentii Foucault. Aceste pierderi se reduc foarte mult folosind tole subțiri din fier cu siliciu. Pentru transformatoarele de înaltă frecvență din radiotehnică se folosesc miezuri din pulberi de fier, aglomerate și izolate între ele printr-un liant izolator. De asemenea se folosesc miezuri din ferită (oxizi de fier cu alți oxizi), care au permeabilitatea relativă mare și conductibilitate mică. Se mai produc pierderi în înfășurări prin efect Joule. Transformatoarele de mare putere sînt răcite în băi de ulei sau alte dispozitive speciale.

7.3. Experiențe cu transformatoare. a. *Ridicarea tensiunii.* Primarul (L_1), de 300 spire, este conectat la o tensiune alternativă U_1 de 10 ... 20 V, de la un dispozitiv potențiometric R , alimentat la rețea. În circuitul secundarului (L_2) se montează o lampă cu neon Ne (fig. 7.3). Bobina secundară are 1 200 de spire. La închiderea circuitului, lampa cu neon luminează. Conectată direct la bornele primarului 1–2, ea nu luminează, tensiunea U_1 fiind mai mică decât cea necesară. Deci $U_2 > U_1$.

b. *Coborîrea tensiunii.* În montajul din figura 7.4, primarul transformatorului, L_1 , introdus pe o ramură a miezului de fier divizat, are 1 200 de spire,

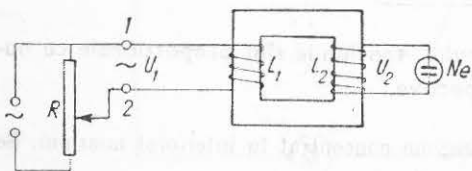


Fig. 7.3

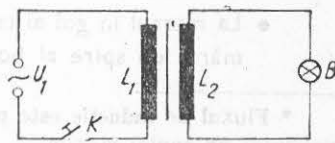


Fig. 7.4

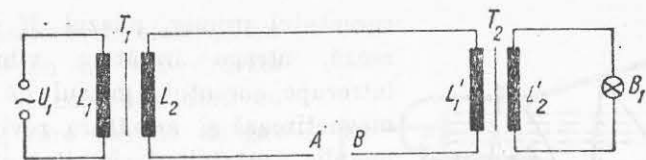


Fig. 7.5

iar secundarul L_2 introdus pe cealaltă ramură a miezului, are 10–20 spire. Circuitul secundarului se închide prin beculețul B de 6 V. La închiderea întrepruatorului K , becul luminează normal, deși conectat la tensiunea U_1 din primar, 220 V, s-ar fi ars imediat. În același montaj se înlocuiește bobina L_2 de 20 spire, cu alta de 2–4 spire și se închide circuitul secundar printr-un cui cu diametrul de 2–3 mm; după scurt timp se înroșește și se topește. Tensiunea a coborît de ≈ 300 ori, iar intensitatea în secundar a crescut de același număr de ori, ceea ce duce la topirea cuiului. Pe acest principiu se bazează funcționarea transformatorului pentru topit metale, pentru sudură prin puncte sau transformatorul de sonerie.

c. *Transportul energiei electrice la distanță.* Se poate demonstra principiul acestui transport făcînd montajul din figura 7.5. U_1 reprezintă tensiunea alternatorului de la centrala electrică (în cazul nostru tensiunea la rețea). T_1 este transformatorul ridicător de tensiune (L_1 de 600 spire, L_2 de 1 200 spire), iar T_2 este transformatorul coboritor de tensiune la locul de consum (L_1 de 12 000 spire, L_2 de 600 spire). B_1 este un bec de 200 V și reprezintă consumatorul. Firele de legătură între T_1 și T_2 sînt foarte subțiri și lungi de cîțiva metri. Unul dintre ele este întrerupt ($A-B$), unde se formează un descărcător de cîțiva milimetri. Poate fi înlocuit cu un rezistor de rezistență 10 k Ω iar firul să nu fie întrerupt. La închiderea circuitului primar sar scînteii între $A-B$, dovedind că pe linia de transport tensiunea este mare (circa 4 000 V), iar becul B_1 luminează ca la 220 V.

7.4. Bobina de inducție. Este un transformator alimentat cu curent continuu pulsant. A fost construită de Ruhmkorff (1851). Variațiile de flux magnetic se obțin prin întreruperea periodică a curentului primar, cu ajutorul unui vibrator, la fel ca la soneria electrică. În jurul unui miez M făcut dintr-un fascicul de fire de fier izolate (fig. 7.6) este bobinată înfășurarea primară P din sîrma groasă și scurtă, alimentată cu curent continuu de tensiune U mică, 4 ... 8 V. Întreruperea și restabilirea periodică a curentului primar o face vibratorul V . Deasupra înfășurării primare și izolată de ea, se află înfășurarea secundară S , formată din multe mii de spire din sîrmă foarte subțire. La trecerea

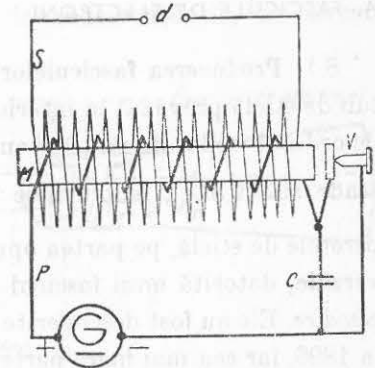


Fig. 7.6

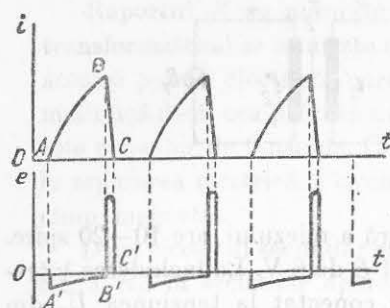


Fig. 7.7

încarcă și elimină scintea care ar prelungi scăderea BC a curentului primar. Ca urmare, în secundar se induce o tensiune $B'C'$ mult mai mare și de același sens cu curentul din primar etc. Așadar, în secundar ia naștere o t.e.m. alternativă, nesinusoidală, avînd la întreruperea circuitului primar amplitudinea mult mai mare (10 kV...40 kV) decît la stabilirea lui. Dacă distanța d dintre bornele secundarului este mică, între ele sar scintea. Crescînd treptat distanța d , la o anumită valoare d_1 va produce scintea numai alternanța corespunzătoare întreruperii curentului primar, cealaltă nu, fiind mai mică. În acest caz, prin secundar se produce curent electric continuu pulsant, bobina funcționează ca transformator ridicător de tensiune cu polaritate neschimbată. Bobina Ruhmkorff se folosește la producerea radiațiilor Röntgen, la descărcările în gaze, la studiul oscilațiilor electrice, pentru a se obține tensiunea necesară scintei la motoarele cu aprindere prin scintea etc.

8. PROCESE ELECTRONICE ÎN GAZE ȘI VID

A. FASCICULE DE ELECTRONI

8.1. Producerea fasciculelor de electroni. Dacă presiunea gazului dintr-un tub de sticlă prevăzut în interior cu doi electrozi (cărora li se aplică o tensiune de ordinul miilor de volți) și cu un tub lateral ce comunică cu o pompă de vid scade sub $1,3 \frac{N}{m^2}$, fenomenele luminoase din interiorul tubului dispar și, pe pereții de sticlă, pe partea opusă catodului, se observă o fluorescență galben-verzuie, datorită unui fascicul de electroni care a primit numele de *radiații catodice*. Ele au fost descoperite de fizicianul german *J.W. Hittorf* (1824—1914) în 1896, iar cea mai mare parte a proprietăților lor au fost descoperite de fizicianul englez *W. Crookes* (1832—1919).

Primele fascicule de electroni au fost obținute cu un tub *Crookes* (fig. 8.1). El se compune dintr-un tub de sticlă, care conține un gaz la o presiune cuprinsă între 1,3 și $0,13 \frac{N}{m^2}$, un catod C și un anod A .

Stabilind între catod și anod o tensiune de mai multe mii de volți, catodul emite un fascicul de electroni, perpendicular pe suprafața lui.

Producerea fasciculelor de electroni (a radiațiilor catodice) se explică astfel:

În gazul dintr-un tub *Crookes* sînt totdeauna cîțiva ioni pozitivi, cărora, datorită cîmpului electric existent, li se imprimă o mișcare accelerată și ei sînt dirijați la catod. Datorită vidului înaintat, ionii nu sînt opriți de moleculele de gaz, iar cîmpul electric intens face ca viteza lor să fie suficient de mare și la ciocnirea de catod provoacă o emisie de electroni. Acești electroni emiși sînt dirijați spre anod. În drumul lor întîlnesc moleculele sau atomii gazului din tub și extrag acestora electroni. Se formează noi ioni pozitivi, care joacă același rol ca și primii.

Astăzi, producerea fasciculelor foarte subțiri (focalizate) de electroni în numeroase aparate (osciloscop electronic, microscop electronic etc.), se bazează pe *emisia termo-electronică*, care este o emisie de electroni de către substanțe aduse la o temperatură înaltă.

Pentru a produce fascicule de electroni pe baza emisiei termoelectronice, ne folosim de un *tun electronic* (delimitat pe figura 8.2 cu o linie întreruptă) notat cu T , care se compune din:

— un filament F care poate fi adus la incandescență de un circuit de încălzire;

— un electrod cilindric W , perforat și adus la un potențial negativ. Acest electrod focalizează electronii prin orificiul O al anodului. La ieșirea din anod fasciculul de electroni este foarte subțire;

— un anod cilindric A prevăzut cu o mică deschidere O .

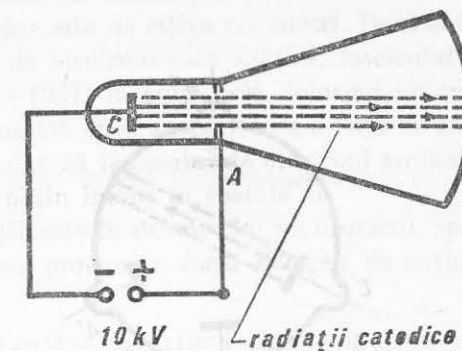


Fig. 8.1

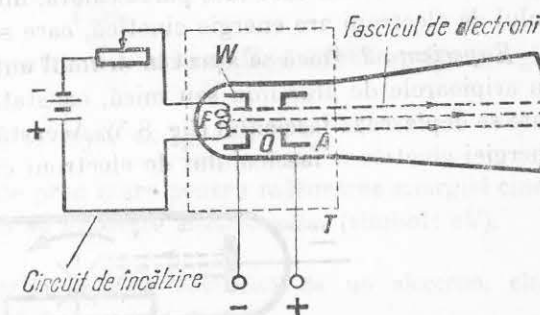


Fig. 8.2

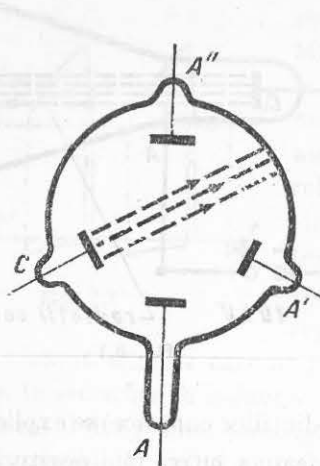


Fig. 8.3

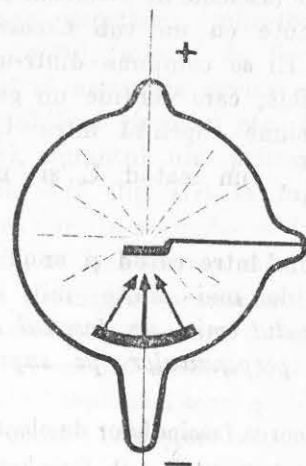


Fig. 8.4

8.2. Proprietățile fasciculelor de electroni

a) *Fasciculele de electroni produc fluorescența unor substanțe.* Dacă introducem în interiorul unui tub Crookes diferite substanțe, constatăm că ele devin fluorescente când sunt bombardate de fasciculul de electroni. În acest caz substanțele absorb energia electronilor și o eliberează sub formă de radiații luminoase de diferite culori.

b) *Fasciculele de electroni se propagă în linie dreaptă perpendicular pe suprafața catodului.* Pentru a pune în evidență această proprietate, ne folosim de un tub Crookes cu mai mulți anodi. Observăm că sticla devine fluorescentă numai în partea opusă catodului pe o direcție perpendiculară pe suprafața acestuia, chiar dacă punem sub tensiune pe rind anozii din A, A' sau A'' (fig. 8.3). Deci poziția anodului nu influențează direcția fasciculului de electroni când aceștia au viteze foarte mari.

c) *Fasciculele de electroni au energie cinetică*

Experiența 1. Într-un tub Crookes, care are catodul în forma unei calote sferice, fasciculul de electroni concentrat asupra unei foițe de platină, plasată în centrul sferei din care face parte calota, înroșește foița (fig. 8.4). Deci fasciculul de electroni are energie cinetică, care se transformă în energie termică.

Experiența 2. Dacă se așază în drumul unui fascicul de electroni o morișcă cu aripioarele de aluminiu sau mică, constatăm că ea se rotește în sensul în care se deplasează fasciculul (fig. 8.5). Această experiență dovedește transferul energiei cinetice a fasciculului de electroni către morișcă.



Fig. 8.5

d) *Fasciculele de electroni sunt absorbite de substanțele pe care le întâlnesc.* Parcursul unui fascicul de electroni în aer este de câțiva milimetri. Dacă substanța așezată în drumul fasciculului de electroni este subțire, fasciculul o străbate. Astfel *Philipp Lenard* (1862—1947) în anul 1894, folosind un tub Crookes ce avea în fața catodului o fereastră mică acoperită cu o foiță de aluminiu (de 0,002 mm grosime), a constatat că fasciculul de electroni străbate foița de aluminiu dar acesta era mai puțin intens în spatele ei.

e) Dacă un fascicul de electroni întâlnește în drumul lui un obstacol, spre exemplu o placă de platină sau tungsten, produce *radiații Röntgen*, de natură deosebită de a radiațiilor catodice.

8.3. *Viteza electronilor în tuburile Crookes.* La ieșirea din catod electronii au o viteză neglijabilă. Putem considera $v_0 = 0$. Cunoaștem de la electricitate, că dacă o sarcină electrică q se deplasează de la un punct A unde potențialul este V_A , la un punct B ce are potențialul V_B , lucrul mecanic efectuat de câmpul electric este:

$$W = q(V_A - V_B).$$

În cazul electronului

$$q = -e, V_B > V_A; V_B - V_A = U$$

de unde:

$$W = eU,$$

în care e este sarcina electronului, iar U diferența de potențial dintre anod și catod.

Acest lucru mecanic W este egal cu variația energiei cinetice a electronului (conform principiului conservării energiei) și, deoarece energia cinetică inițială a electronului este zero, rezultă:

$$W = \frac{1}{2} m_0 v^2, \text{ unde } m_0 \text{ este masa de repaus a electronului, iar } v \text{ viteza lui.}$$

Deci putem scrie:

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = eU \quad (1)$$

sau

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}}. \quad (2)$$

Folosind formula $W = eU$, pentru o tensiune $U = 10\,000$ volți energia cinetică a electronului este:

$$W = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^4 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ J}.$$

Se vede că jouleul este o unitate prea mare pentru măsurarea energiei cinetice a particulelor, din care cauză se folosește *electronvoltul* (simbol: eV).

• Un electronvolt este energia cinetică dobândită de un electron, când este accelerat de o diferență de potențial de 1 V.

După formula $W = eU$ această energie este:

$$W = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

$$1 \text{ electronvolt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ jouli}$$

8.4. Acțiunea câmpului electric uniform asupra unui fascicul de electroni.

Experiență. Se folosește un tub Crookes, în care anodul se găsește aproape de catod și este prevăzut cu o diafragmă ce lasă să treacă un fascicul îngust de electroni printr-o plăcile unui condensator P_1P_2 (fig. 8.6, a). Partea interioară a peretelui anterior, ecranul, este acoperită cu o substanță fluorescentă. Dacă condensatorul nu este încărcat observăm pe ecranul tubului o pată fluorescentă B_0 .

Legind armătura P_1 la borna pozitivă a unui generator de curent și armătura P_2 la borna negativă, observăm că pata fluorescentă se deplasează în B , spre armătura încărcată pozitiv, ceea ce demonstrează că:

- Un fascicul de electroni este deviat de un câmp electric

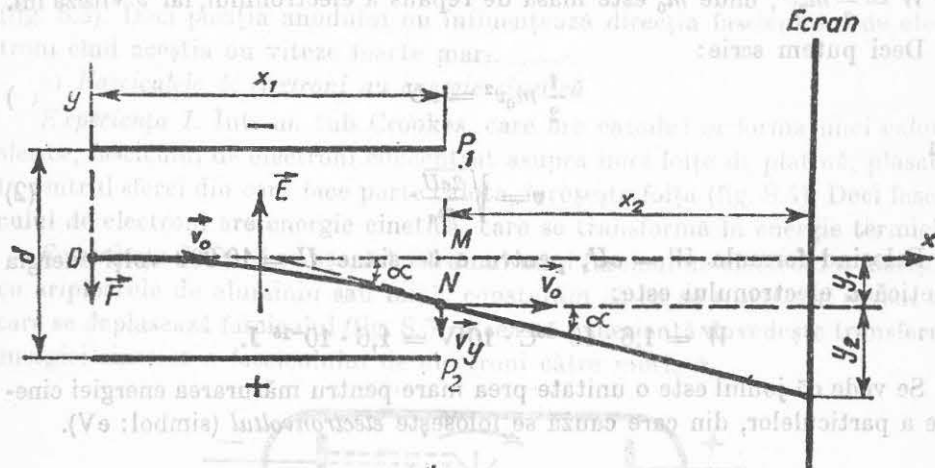
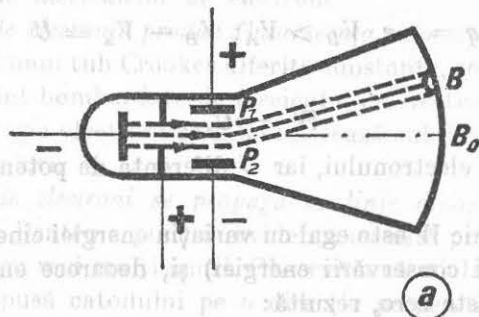


Fig. 8.6

Fasciculul fiind atras de armătura pozitivă și respins de armătura negativă, se confirmă că particulele fasciculului sînt sarcini electrice negative (electroni).

Calculul deviației electronului în câmp electric uniform. Să considerăm un electron, care pătrunde într-un câmp electric uniform $\vec{E}$, perpendicular pe liniile de forță, cu viteza $\vec{v}_0$. Electronul, de sarcină electrică $-e$, este supus unei forțe electrice $\vec{F} = -e\vec{E}$, dirijată în sens contrar câmpului electric $\vec{E}$.

Raportăm mișcarea electronului la două axe rectangulare (fig. 8.6, b): axa Ox orientată în sensul vitezei $\vec{v}_0$ și Oy orientată în același sens cu $\vec{E}$.

Forța electrică are următoarele componente pe Ox și Oy :

$$F_x = 0 \quad \text{și} \quad F_y = eE.$$

Rezultă, după legea a II-a a dinamicii $\vec{F} = m\vec{a}$, unde m este masa electronului, iar a accelerația. Mișcarea electronului pe traiectoria ON poate fi descompusă în două mișcări ale proiecției lui pe Ox și Oy :

— mișcarea electronului după Ox are o accelerație $a_x = \frac{F_x}{m} = 0$; deci este o mișcare uniformă;

— mișcarea electronului după Oy are accelerația $a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{eE}{m} = \text{const.}$; deci este o mișcare uniform accelerată.

Ecuatiile mișcării, ținînd seama de componenta vitezei inițiale care pe Ox este v_0 și pe Oy este nulă (adică $v_x = v_0$ și $v_y = 0$) sînt:

$$\begin{cases} x_1 = v_0 t \\ y_1 = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E t^2 \end{cases} \quad (3)$$

unde timpul t de parcurgere a segmentului MN este egal cu timpul cît electronul parcurge lungimea OM , adică $t = \frac{x_1}{v_0}$. Eliminînd pe t între cele două ecuații din (3) obținem:

$$y_1 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{E}{v_0^2} x_1^2$$

care este ecuația traiectoriei electronului și reprezintă o parabolă.

Dacă U este tensiunea dintre armăturile condensatorului ce sînt la distanța d , avem $E = \frac{U}{d}$ și în fine:

$$y_1 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1^2}{v_0^2}$$

La ieșirea din câmpul electric, electronul se mișcă după o dreaptă tangentă în punctul N la parabolă, care face cu Ox un unghi α .

Pe ecran, la depărtarea x_2 de condensator, obținem o deviație totală $y = y_1 + y_2$; $y_2 = x_2 \tan \alpha$ iar $\tan \alpha$ este dat de raportul $\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x}$, unde v_y este componenta vitezei electronului pe Oy la ieșirea din condensator.

$$v_y = a_y t = \frac{eE}{m} \cdot \frac{x_1}{v_0}$$

deci

$$y_2 = \frac{e}{m} \frac{Ex_1 x_2}{v_0^2} = \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1 x_2}{v_0^2}$$

și

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1^2}{v_0^2} + \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1 x_2}{v_0^2}$$

sau

$$y = \frac{e}{m} \frac{U}{2dv_0^2} (x_1^2 + 2x_1 x_2) \quad (5)$$

adică, deviația electronului în câmp electric uniform este:

- proporțională cu tensiunea U dintre armăturile condensatorului;
- proporțională cu $\frac{e}{m}$ (sarcina specifică a electronului);
- invers proporțională cu pătratul vitezei inițiale v_0 a electronului la intrarea lui în câmpul electric.

Relația (5) este valabilă pentru orice particulă încărcată deviată într-un câmp electric uniform.

8.5. Acțiunea câmpului magnetic uniform asupra unui fascicul de electroni. *Experiență.* Se așază un tub Crookes între polii unui magnet în formă de potcoavă (fig. 8.7, a); fasciculul de electroni este deviat.

- Un fascicul de electroni este deviat de un câmp magnetic.

Calculul deviației electronului în câmp magnetic uniform. Să considerăm un electron care intră cu viteza $\vec{v}_0$ perpendicular pe liniile de câmp ale câmpului magnetic uniform de inducție $\vec{B}$ (fig. 8.7, b).

Forța lorentziană $\vec{f} (f = -e\vec{v} \times \vec{B})$ este permanent perpendiculară pe viteza $\vec{v}_0$ și pe inducția magnetică $\vec{B}$ și acționează ca o forță centripetă, și, ca urmare, electronul descrie o traiectorie circulară de rază r .

Se poate scrie deci:

$$ev_0 B = \frac{mv_0^2}{r} \quad (6)$$

de unde:

$$\frac{1}{r} = \frac{eB}{mv_0} \quad (7)$$

Pe figura 8.7, b deviația electronului este $PM = Z$, în planul xOz .

Dacă însemnăm cu l proiecția lui OM pe Ox , din triunghiul OMO'' se deduce aplicind teorema înălțimii că:

$$l^2 = Z(2r - Z)$$

Cum deviația este foarte mică, putem considera segmentul $O''M' \approx 2r$, astfel că relația precedentă se mai poate scrie:

$$l^2 = 2Zr$$

de unde:

$$\frac{1}{r} = \frac{2Z}{l^2}$$

și din (7) rezultă:

$$\frac{2Z}{l^2} = \frac{eB}{mv_0}$$

sau

$$Z = \frac{eB}{mv_0} \cdot \frac{l^2}{2} \quad (8)$$

Prin urmare, deviația electronului în câmp magnetic uniform este:

- proporțională cu inducția magnetică B ;
- proporțională cu sarcina specifică a electronului $\frac{e}{m}$;
- invers proporțională cu viteza inițială v_0 a electronului la intrarea în câmpul magnetic.

Relația (8) este valabilă pentru orice particulă încărcată deviată într-un câmp magnetic uniform.

8.6. Osciloscopul electronic. Aparatele care utilizează deviația unui fascicul de electroni, sub acțiunea unui câmp electric sau magnetic, sînt numeroase. Așa, de exemplu: osciloscopul electronic, microscopul electronic, tuburile videocaptoare și videoreproductoare folosite în televiziune etc.

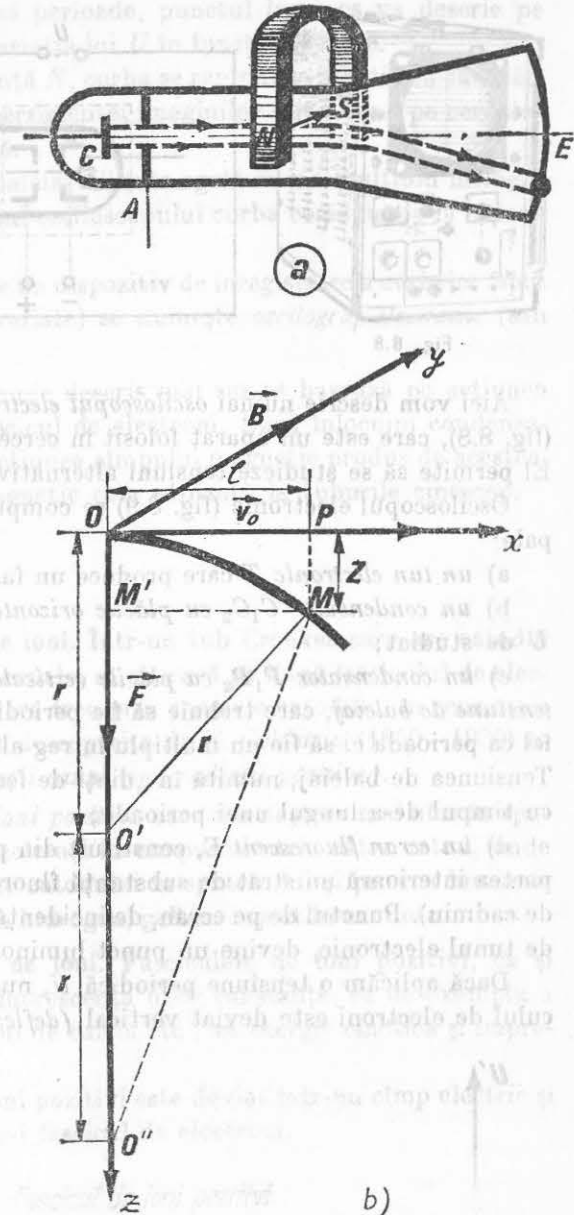


Fig. 8.7

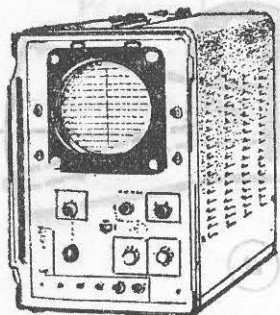


Fig. 8.8

Aici vom descrie numai *osciloscopul electronic* — numit și *osciloscop catodic* (fig. 8.8), care este un aparat folosit în cercetările științifice, în industrie etc. El permite să se studieze tensiuni alternative de înaltă frecvență.

Osciloscopul electronic (fig. 8.9) se compune din următoarele părți principale:

- a) un tun electronic T care produce un fascicul foarte subțire de electroni;
- b) un condensator C_1C_2 cu plăcile orizontale, legate la tensiunea periodică U de studiat;
- c) un condensator P_1P_2 cu plăcile verticale, legate la tensiunea U' , numită tensiune de baleiaj, care trebuie să fie periodică, de frecvență reglabilă, în așa fel ca perioada ei să fie un multiplu întreg al perioadei tensiunii U de studiat. Tensiunea de baleiaj, numită în „dinți de ferăstrău” (fig. 8.10), variază liniar cu timpul de-a lungul unei perioade;
- d) un ecran fluorescent E , constituit din peretele de sticlă ce are depus pe partea interioară un strat de substanță fluorescentă (spre exemplu wolfram de cadmiu). punctul de pe ecran, de incidență a fasciculului de electroni, emiși de tunul electronic, devine un punct luminos.

Dacă aplicăm o tensiune periodică U , numai pe condensatorul C_1C_2 fasciculul de electroni este deviat vertical (*deflexie verticală*), pe ecran observin-

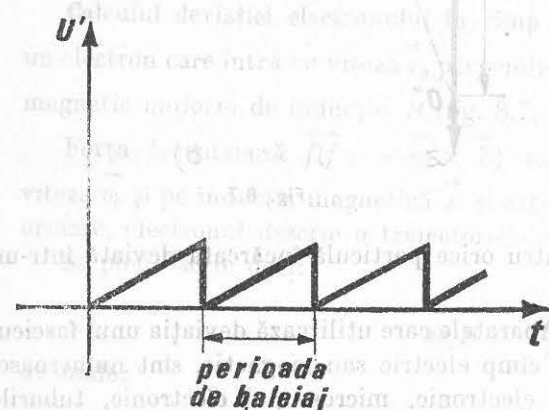


Fig. 8.10

du-se o deplasare pe ordonata Ay (fig. 8.9), proporțională cu valoarea instantanee a tensiunii U . Dacă aplicăm o tensiune U' numai pe condensatorul P_1P_2 , fasciculul de electroni este deviat orizontal (*deflexie orizontală*) și pe ecran provoacă o deplasare pe abscisă Ax , care este proporțională cu timpul (fig. 8.10). Dacă aplicăm simultan tensiunile U și U' pe condensa-

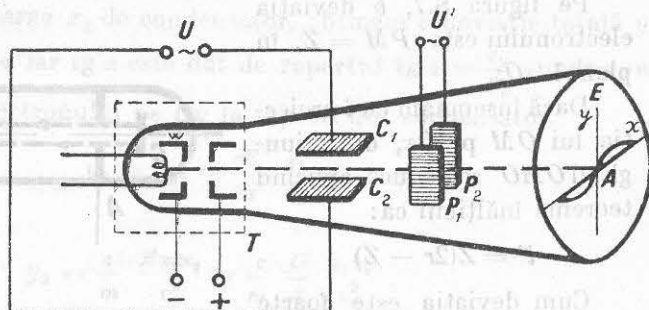


Fig. 8.9

torii C_1C_2 și P_1P_2 , în timpul unei perioade, punctul luminos va descrie pe ecran o curbă, care reprezintă variația lui U în funcție de timp.

Când U și U' au aceeași frecvență N , curba se reproduce identic cu ea însăși de N ori pe secundă și datorită persistenței imaginilor luminoase, pe ecran se vede o curbă luminoasă continuă.

În cazul în care perioada de baleiaj U' este egală cu un multiplu întreg n a tensiunii U de studiat, pe ecranul osciloscopului curba corespunde la n perioade ale tensiunii U .

Osciloscopul electronic care are un dispozitiv de înregistrare a curbelor (spre exemplu când curbele sînt fotografiate) se numește *oscilograf electronic* (sau *oscilograf catodic*).

Observație. Osciloscopul electronic descris mai sus se bazează pe acțiunea cîmpului electric asupra unui fascicul de electroni. Dacă înlocuim condensatoarele prin bobine, se folosește acțiunea cîmpului magnetic produs de acestea. Deflexia electronilor în cîmp magnetic este utilizată la tuburile cinescop.

B. FASCICULE DE IONI

8.7. Producerea fasciculelor de ioni. Într-un tub Crookes care are catodul străbătut de unul sau mai multe canale, se observă pe lângă fasciculul de electroni, un alt fascicul de radiații care trec prin canalele catodului în sens opus (fig. 8.11). Aceste radiații au fost descoperite de *E. Goldstein* (1850—1930) în anul 1886 și au fost numite *radiații canal* (sau *radiații pozitive*).

Acest fascicul este format din ioni pozitivi, care iau naștere mai ales în spațiul întunecat Crookes și sînt accelerați în cîmpul electric către catod, unde datorită inerției trec prin canalele catodului în spatele lui și produc luminescența gazului: gălbui în aer, roz în hidrogen, galben-roșcat în azot etc.

8.8. Proprietățile fasciculelor de ioni. Fasciculele de ioni pozitivi, ca și fasciculele de electroni, produc fluorescența unor substanțe, ca de exemplu a silicatlui de zinc, a wolframului de calciu etc., au energie cinetică și impresionează o placă fotografică.

De asemenea un fascicul de ioni pozitivi este deviat într-un cîmp electric și magnetic, dar în sens contrar unui fascicul de electroni.

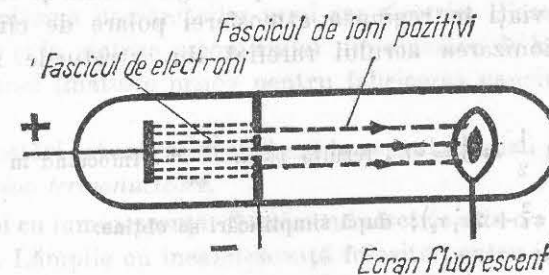


Fig. 8.11

În ceea ce privește mărimea deviației ionilor pozitivi în câmp electric, se constată că ea este tot atât de mare ca și a electronilor, dacă ambele particule sînt accelerate de aceeași tensiune*.

Într-un câmp magnetic ionii pozitivi sînt deviați mai puțin decît electronii; ne explicăm aceasta, ținînd seamă de formula (8), care arată că devierea unei particule electrizate într-un câmp magnetic este invers proporțională cu masa particulei. Cunoșcînd că masa unui ion pozitiv de hidrogen este de circa 1 836 ori mai mare decît a unui electron, pentru a obține aceeași deviație ca a unui electron, trebuie să folosim un câmp magnetic de cel puțin 1 836 ori mai intens.

Fasciculele de ioni pozitivi sînt folosite în *spectrograful de masă* pentru determinarea compoziției izotopice a unei substanțe.

C. PLASMĂ

8.9. Proprietățile plasmăi. Fizicianul american *Irving Langmuir* (1881—1957) a dovedit experimental, în 1922, că în tuburile de descărcare, în coloana pozitivă, intensitatea cîmpului electric are valoare mică, ceea ce înseamnă că concentrația sarcinilor pozitive este aproape egală cu a sarcinilor negative. Această stare specială în care se găsește gazul ionizat în tubul de descărcare a primit denumirea de *plasmă*.

- Prin plasmă înțelegem un amestec, neutru din punct de vedere electric, de ioni pozitivi și electroni în stare liberă.

Plasma este considerată ca cea de-a patra stare de agregare a materiei pe lângă stările: solidă, lichidă și gazoasă. În univers substanțele se găsesc într-un raport de 99,9% în stare de plasmă. Pămîntul și planetele reci fac excepție de la această stare generală. Totuși, în pătura din atmosferă care înconjoară Pămîntul la înălțimi cuprinse între 80—90 km (și chiar mai mult), gazul se găsește în stare de plasmă. Ionizarea gazului în această regiune se datorește radiației solare. De asemenea în straturile superioare ale atmosferei, în *aurorile polare* aerul este în stare de plasmă.

Aurora polară se prezintă ca o lumină difuză, de culoare uneori verde-pal, alteori roșiatică, sub formă de benzi, draperii, coroane etc. Formarea aurorei polare se explică prin faptul că Soarele pe lângă lumină și căldură emite și electroni, care, deviați în regiunea atmosferei polare de cîmpul magnetic terestru, produc ionizarea aerului rarefiat din straturile superioare ale atmosferei.

* În adevăr, din $\frac{1}{2} mv_0^2 = eU_0$ rezultă $v_0^2 = \frac{2eU_0}{m}$. Înlocuind în

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{U}{dv_0^2} (x_1^2 + 2x_1x_2); \text{ după simplificări se obține:}$$

$$y = \frac{1}{4d} \frac{U}{U_0} (x_1^2 + 2x_1x_2), \text{ adică deviația este independentă de sarcină.}$$

În regiunea din canalul descărcării unui fulger, aerul este tot în stare de plasmă.

Plasma din tuburile de descărcare, din aurorele polare etc., în care temperatura gazului ionizat nu depășește cîteva zeci de grade Celsius se numește *plasmă rece*.

Plasma în flăcările de temperatură înaltă în care ionizarea gazului se face pe bază termică se numește *plasmă fierbinte*.

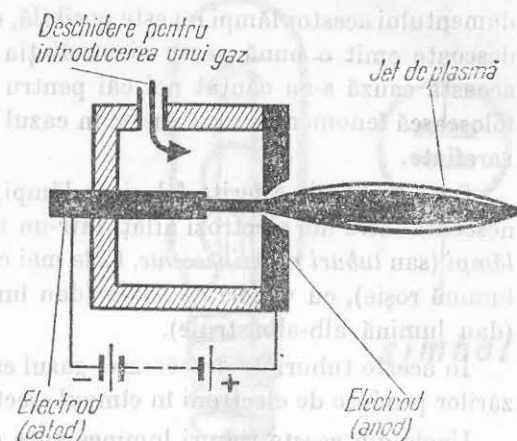


Fig. 8.12

8.10. Aplicațiile plasmăi în tehnică. Plasma are o mare importanță tehnică datorită numeroaselor sale utilizări. Așa, de exemplu, în industria metalurgică pentru sudarea și tăierea metalelor, a betoanelor, a rocilor etc., se folosește un dispozitiv special numit *plasmotron*, care produce un jet de plasmă.

În plasmotron (fig. 8.12) între cei doi electrozi legați la o sursă de curent continuu, cu o tensiune de circa 300 V, la un curent de 1 000 A, are loc o descărcare în arc.

Introducînd în camera de ardere un gaz (argon, heliu, hidrogen sau azot) el se proiectează în exterior, prin orificiul practicat în anod, sub forma unui jet de plasmă lung de 5—10 cm, cu diametrul de 5—10 mm. Temperatura jetului de plasmă în canalul central atinge 50 000°C.

În prezent se caută metode pentru transformarea energiei termice în energie electrică, excluzînd fazele intermediare. Unul din aceste procedee bazat pe proprietățile gazului în stare de plasmă este folosirea *generatorului magneto-hidrodinamic*. În principiu el constă dintr-un jet de plasmă ce intră într-un câmp magnetic intens, ale cărui linii de forță sînt perpendiculare pe direcția de mișcare a jetului. În acest câmp magnetic sarcinile electrice de semne contrare se separă, fiind colectate de doi electrozi.

Plasma a început să fie folosită tot mai mult pentru producerea unor reacții chimice. Așa, de exemplu, obținerea acetilenei se face trecînd un curent de gaz metan în plasma descărcărilor unui arc electric. Plasma descărcărilor în arc se folosește și la sinteza amoniacului din amestec de hidrogen și azot sau a ciclopentadienei (materie primă pentru fabricarea cauciucului sintetic) din metan etc.

În fine, cercetări actuale se desfășoară în sensul folosirii plasmăi pentru producerea *reacțiilor termionucleare*.

8.11. Lămpi cu luminescență. Iluminatul electric este o aplicație importantă a electricității. Lămpile cu incandescență folosite pentru iluminat dau numai circa 2,5% din energia electrică primită, sub formă de energie luminoasă, iar restul de 97,5% se transformă în energie termică. O mărire sensibilă a ran-

damentului acestor lămpi nu este posibilă, deoarece toate corpurile solide incandescente emit o bună parte din radiația lor în afara spectrului vizibil. Din această cauză s-au căutat noi căi pentru iluminat. Astfel s-a încercat să se folosească fenomenele care au loc în cazul trecerii curentului electric prin gaze rarefiate.

S-au construit diferite feluri de lămpi, care au la bază o descărcare luminescentă între doi electrozi aflați într-un tub cu anumite gaze, care se numesc *lămpi* (sau *tuburi*) *luminescente*. Cele mai cunoscute sînt: tuburile cu neon (dau lumină roșie), cu vapori de sodiu (dau lumină galbenă), cu vapori de mercur (dau lumină alb-albăstruie).

În aceste tuburi de descărcare, gazul este în stare de plasmă, datorită ionizărilor produse de electroni în câmpul electric dintre electrozi.

Unele din aceste tuburi luminescente sînt folosite la reclamele luminoase; ele se numesc *tuburi Geissler*, după numele constructorului lor *H. Geissler* (1815—1879).

Tuburile fluorescente sînt de asemenea tuburi cu luminescență care conțin sub o presiune de circa $0,6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ argon sau heliu amestecat cu vapori de mercur.

Pe partea interioară a tubului se aplică un strat subțire dintr-o substanță fluorescentă numită *luminofor*, ca de exemplu: fosfatul de calciu, sulfura de zinc etc.

În timpul descărcării, în gazul din tub se emit radiații, care în cea mai mare parte sînt radiații ultraviolete. Ele iluminează luminoforul, care absoarbe radiațiile ultraviolete și emite raze de lumină vizibilă. O alegere potrivită a luminoforilor face ca tubul să dea o lumină albă ca a zilei, sau o lumină cu o nuanță roz pentru iluminatul interioarelor. Emisia de lumină la tuburile luminescente și fluorescente nu este obținută la temperaturi mari ca în cazul lămpilor cu incandescență, de aceea ele se mai numesc și surse de lumină rece.

Randamentul tuburilor fluorescente este de 3 ori mai mare decît al lămpilor cu incandescență.

Pentru ca tubul fluorescent să poată funcționa cu o tensiune de la rețea, se utilizează un circuit special de aprindere în care se găsește un *starter S* (fig. 8.13). Acesta constă dintr-un tub mic umplut cu gaz inert, în care se găsesc doi electrozi dintre care unul este format dintr-o lamă bimetalică, care la încălzire se încovoie și atinge celălalt electrod.

La aplicarea tensiunii, prin închiderea întrerupătorului *K* în starter se produce o descărcare prin scînteie, care este însoțită de o încălzire și o îndoire a electrodului cu bimetal, ceea ce provoacă un contact între electrozi. În acest caz se produce o închidere a circuitului rețelei prin doi electrozi ai tubului *T* și ei devin incandescenti. Acum lama bimetalică se răcește și revine la poziția inițială, deoarece descărcarea luminescentă în starter încetează la contactul dintre electrozi. În acest fel curentul este întrerupt și ca urmare la bornele bobinei *B* se produce o creștere bruscă de tensiune (un șoc electric), care se

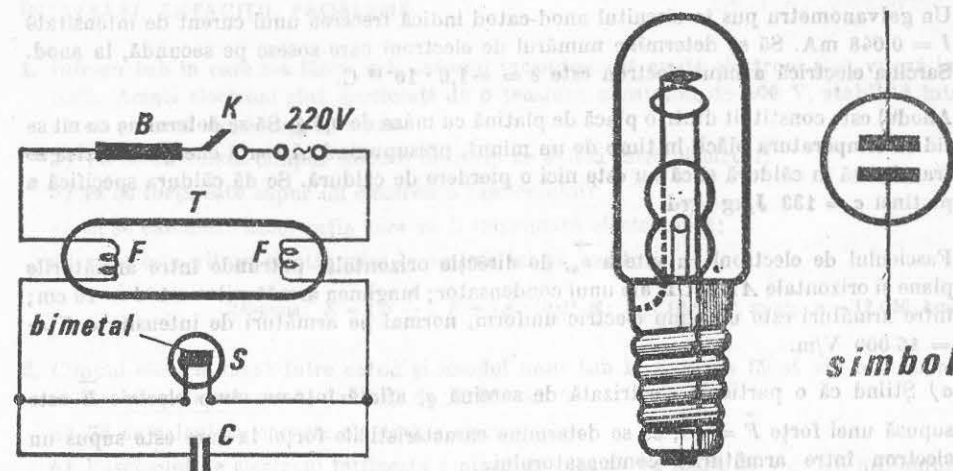


Fig. 8.13

Fig. 8.14

transmite electrozilor tubului și în tubul *T* are loc o descărcare electrică (se produce aprinderea tubului).

După aprindere, bobina limitează intensitatea curentului în plasma din tub la valoarea necesară pentru funcționare. În schema din figura 8.13 este indicat și un condensator *C* conectat în paralel cu starterul; el are rolul de a forma un scurtcircuit pentru undele de înaltă frecvență, care se produc în tub în timpul funcționării lui.

8.12. Lampa cu neon. O lampă cu descărcări luminescente de tip particular, care se folosește pentru semnalizări, ca becuri de control, în radiotehnică etc., este *lampa* (numită și *becul*) *cu neon* (fig. 8.14). Ea este construită dintr-un tub de sticlă ce conține neon la presiune redusă și doi electrozi (în formă de placă, inel, cilindru fir etc.), din fier sau aluminiu. Prin bec trece curent electric numai dacă tensiunea de la bornele lui ajunge la tensiunea de aprindere, tensiune care depinde de tipul becului.

Trecerea curentului electric prin becul cu neon este însoțită de o luminescență de culoare roșiatică-portocalie, care crește în intensitate odată cu intensitatea curentului. În cazul unei tensiuni continue, luminescența se obține doar la catod, iar în cazul unei tensiuni alternative, luminescența apare în jurul ambilor electrozi.

Pentru a evita deteriorarea becului cu neon, el se montează totdeauna în serie cu o rezistență care limitează curentul (această rezistență este montată deseori în soclul becului).

PROBLEME REZOLVATE

1. Într-un tub Crookes, tensiunea dintre anod și catod imprimă electronilor, a căror masă este $m = 9 \cdot 10^{-31}$ kg, o viteză $v_0 = 30\,000$ km/s. Să se calculeze energia cinetică a unui electron.

2. Un galvanometru pus în circuitul anod-catod indică trecerea unui curent de intensitate $I = 0,048$ mA. Să se determine numărul de electroni care sosesc pe secundă, la anod. Sarcina electrică a unui electron este $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

3. Anodul este constituit dintr-o placă de platină cu masa de 0,3 g. Să se determine cu cât se ridică temperatura plăcii în timp de un minut, presupunând că toată energia cinetică se transformă în căldură și că nu este nici o pierdere de căldură. Se dă căldura specifică a platinei $c = 133$ J/kg·grad.

4. Fasciculul de electroni cu viteza $\vec{v}_0$, de direcție orizontală, pătrunde între armăturile plane și orizontale AB și CD ale unui condensator; lungimea armăturilor este $l = 10$ cm; între armături este un câmp electric uniform, normal pe armături de intensitate $E = 16\,000$ V/m.

a) Știind că o particulă electricizată de sarcină q , aflată într-un câmp electric $\vec{E}$ este supusă unei forțe $\vec{F} = q\vec{E}$, să se determine caracteristicile forței la care este supus un electron între armăturile condensatorului.

b) Să se verifice că greutatea unui electron este neglijabilă față de forța precedentă.

c) Să se determine traiectoria unui electron între armăturile condensatorului; să se calculeze deviația suferită de fascicul în planul vertical pe $\vec{v}_0$ și sprijinindu-se pe marginile B și D ale condensatorului.

(Bacalaureat; Réunion 1966.)

$$1. W_c = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{14} = 40,5 \cdot 10^{-17} \text{ J} = 2\,531 \text{ eV.}$$

$$2. Q = I \cdot t = 48 \cdot 10^{-6} \text{ C.}$$

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{48 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3 \cdot 10^{14} \text{ electroni.}$$

$$3. t = \frac{W}{mc} = \frac{40,5 \cdot 10^{-17} \cdot 3 \cdot 10^{14} \cdot 60}{3 \cdot 10^{-4} \cdot 133} = 205,2 \text{ grad.}$$

4. a) Electronul de sarcină $q = -e$ este supus unei forțe $\vec{F}$ astfel că:

$$\vec{F} = q\vec{E} = -e\vec{E}$$

— forța este dirijată în sens contrar câmpului;

— deoarece câmpul este uniform ($E = \text{const.}$), forța este constantă.

Forța electrică este:

$$F = eE = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 10^3 = 3,56 \cdot 10^{-15} \text{ N.}$$

b) Greutatea electronului de masă $m = 9 \cdot 10^{-31}$ kg este:

$$G = mg = 9 \cdot 10^{-31} \cdot 9,8 = 8,82 \cdot 10^{-30} \text{ N}$$

raportul $\frac{F}{G} = 0,29 \cdot 10^{15}$, deci G este neglijabil față de F .

c) Vezi figura 8.6 și formula (4).

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1^2}{v_0^2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{Ex_1^2}{v_0^2}$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{14}} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

ÎNTREBĂRI, EXERCIIII, PROBLEME

1. Într-un tub în care s-a făcut vid, catodul incandescent emite electroni fără viteză inițială. Acești electroni sînt accelerați de o tensiune constantă de 400 V, stabilită între catod și anod depărtați la 4 cm.

a) Să se calculeze câmpul electric uniform ce există între electrozi;

b) la ce forță este supus un electron a fasciculului?

c) să se calculeze accelerația care va fi imprimată electronului;

d) care este viteza electronului la sosirea lui pe anod;

$$\text{Răspuns: } E = 104 \frac{\text{V}}{\text{m}}; F = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ N}; a = 18 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2; v = 12\,000 \text{ km/s.}$$

2. Câmpul electric creat între catod și anodul unui tub în care s-a făcut vid accelerează electronii și le imprimă o viteză de 12 000 km/s.

a) Să se calculeze energia cinetică a electronului.

b) Fasciculul de electroni înfilnește o placă de platină cu masa de 4 g. Un miliampermetru așezat în circuitul tubului arată un curent de 0,08 mA. Să se calculeze cu câte grade se mărește temperatura plăcii de platină după 40 s. Se dă căldura specifică a platinei $c = 133$ J/kg·grad.

$$\text{Răspuns: } W = 405 \text{ eV}; t = 2,4 \text{ grad.}$$

3. Viteza unui electron pentru o tensiune de accelerare a unui tub Crookes de 10 000 V este de 58 340 km/s, iar a unui ion pozitiv pentru aceeași tensiune este de 14 000 km/s. De ce viteza ionului pozitiv este mult mai mică în comparație cu a electronului?

4. Într-un câmp electric transversal, uniform, de intensitate: $E = 45\,000$ V/m, pătrunde un fascicul de ioni pozitivi a căror viteză este $v = 2\,000$ km/s. Devierea fasciculului de la direcția inițială este $y = 2,15$ cm pentru un drum parcurs de 20 cm. Să se calculeze sarcina specifică a ionului pozitiv.

$$\text{Răspuns: } \frac{q}{m} = 0,95 \cdot 10^4 \text{ C/kg.}$$

5. Un electron pătrunde cu viteză de $4 \cdot 10^7$ m/s, perpendicular pe liniile câmpului electrostatic dintre plăcile unui condensator plan, lung de 4 cm, cu distanța dintre plăci de 1,6 cm avînd aplicată tensiunea de 910 V. Se neglijează variația relativistă a masei cu viteza. Se cer:

a) forța ce acționează asupra electronului între plăcile condensatorului;

b) ecuația traiectoriei electronului;

c) viteza electronului la ieșirea dintre plăcile condensatorului;

d) deviația electronului produsă pe un ecran fluorescent aflat la 10 cm de extremitatea plăcilor condensatorului perpendicular pe ele;

e) forma traiectoriei electronului și raza de curbura dacă el pătrunde într-un câmp magnetic de inducție $9,1 \cdot 10^{-4}$ T, aflat în locul condensatorului.

Experiența se petrece în vid.

(Concursul de fizică, etapa locală, 1969)

$$\text{Răspuns: a) } F = 9,1 \cdot 10^{-15} \text{ N; b) } y_1 = \frac{25}{8} x^2; \text{ traiectoria este o parabolă;}$$

$$\text{c) } v = 10^7 \sqrt{17} \text{ m/s; d) } y = 3 \text{ cm; e) } r = 25 \text{ cm.}$$

9. SEMICONDUCTORI

A. CURENTUL ELECTRIC ÎN SEMICONDUCTORI

9.1. **Conductori.** Din punct de vedere al conductibilităților electrice corpurile solide se împart în trei mari categorii: conductori (metalele), semiconductori și izolatori.

Metalele au cea mai mare conductibilitate electrică. Rezistivitatea lor este de numai 10^6 — 10^8 $\Omega \cdot m$. Electronii de valență ai atomilor din care este format metalul sunt foarte slab legați de atomi, astfel încât în metal legăturile lor cu atomii sunt rupte și ei se pot deplasa liber. Așadar metalul este alcătuit dintr-o rețea cristalină, în nodurile căreia se găsesc ioni pozitivi, printre care se mișcă *electronii liberi*. În metale se găsesc aproximativ 10^{28} electroni liberi pe m^3 . **Concentrația electronilor liberi în metale nu variază cu temperatura.** Sub acțiunea unui cîmp electric exterior aplicat metalului, electronii liberi capătă o mișcare dirijată și apare deci curentul electric. Electronii constituie purtătorii mobili de sarcină electrică. Rezistența electrică a metalelor se datorește ciocnirilor cu ionii pozitivi ale electronilor acționați de cîmpul extern, în urma cărora este frînată mișcarea lor dirijată. Cu creșterea temperaturii frecvența acestor ciocniri se mărește și crește rezistența electrică. Așadar, în metale, temperatura nu influențează asupra numărului de purtători de sarcină, ci numai asupra mobilității lor, ceea ce face ca rezistența electrică a metalelor să crească cu creșterea temperaturii.

9.2. **Izolatori.** Izolatorii sînt corpuri care practic nu conduc curentul electric. Rezistivitatea lor este enormă, de ordinul 10^8 — 10^{13} $\Omega \cdot m$. Astfel de corpuri sînt de exemplu sarea de bucătărie, mica, ebonita etc. Electronii de valență ai atomilor care formează izolatorii sînt foarte strîns legați de atomi, astfel încît ei nu se pot deplasa liber în cristal. **În izolatori nu există practic purtători de sarcină liberi și de aceea ei nu conduc curentul electric.**

9.3. **Semiconductori.** Semiconductorii sînt corpuri a căror rezistivitate este cuprinsă între cea a metalelor și cea a izolatorilor. Substanțele cu proprietăți semiconductoare sînt foarte răspîndite în natură. Cele mai folosite sînt două din elementele grupei a IV-a a tabelului periodic, germaniul și siliciul. Proprietatea caracteristică a semiconductoarelor este variația foarte puternică a rezistenței lor cu temperatura și anume *scăderea rezistenței cu creșterea temperaturii*. Astfel, rezistivitatea siliciului* la temperatura camerei este de ordinul 10^3 $\Omega \cdot m$, pe cînd la $700^\circ C$ scade aproximativ de un milion de ori, ajungînd la numai 10^{-3} $\Omega \cdot m$. Creșterea conductibilității semiconductoarelor cu creșterea temperaturii indică faptul că, spre deosebire de metale, numărul de purtători de sarcină electrică crește cu temperatura. De exemplu, la siliciu, numărul de

* Este vorba de siliciu foarte pur, care conține atomi străini în raport mai mic de unu la un miliard.

purtători pe m^3 crește de la 10^{-17} la temperatura camerei la 10^{24} la $700^\circ C$, ceea ce explică scăderea rezistivității.

În semiconductori electronii de valență sînt legați de atomi, dar mai slab decît cei ai izolatorilor. Legăturile lor pot fi rupte dacă li se transmite suficientă energie și astfel acești electroni se pot deplasa liber în semiconductor, ca electronii liberi din metale. **Energia minimă necesară pentru trecerea electronilor din stare de electroni legați de atomi în stare de electroni liberi se numește energie de activare.** Energia de activare este o mărime caracteristică fiecărui semiconductor și are valori de ordinul electron-voltului. Energia de activare poate fi transmisă electronilor din semiconductor datorită agitației termice, de aceea, cu creșterea temperaturii crește numărul electronilor ce devin liberi. Din punct de vedere al energiei de activare, deosebirea dintre metale, semiconductori și izolatori se explică astfel: energiile de activare ale izolatorilor sînt foarte mari și practic prin încălzire nu apar purtători; energiile de activare ale semiconductoarelor sînt mai mici, astfel încît prin încălzire apar din ce în ce mai mulți purtători; energia de activare pentru metale este nulă, astfel încît la orice temperatură numărul purtătorilor este același.

9.4. **Purtătorii de sarcină în semiconductori.** În semiconductori participă la conducție nu numai electronii de valență care au primit energie egală cu energia de activare și au devenit liberi, ci și electronii de valență care au rămas legați de atomi. Pentru a înțelege modul în care pot participa la conducție electronii legați, să analizăm comportarea electronilor dintr-un cristal de germaniu, cînd acestuia i se aplică un cîmp electric exterior. Atomul de germaniu are 4 electroni de valență. În cristalul de germaniu fiecare atom este înconjurat de alți 4 atomi, astfel că în jurul fiecărui atom sînt 8 electroni de valență. În figura 9.1, *a* este schițat un model în plan al legăturilor covalente dintre atomii de germaniu, iar în figura 9.1, *b* modelul legăturilor reale. Să presu-

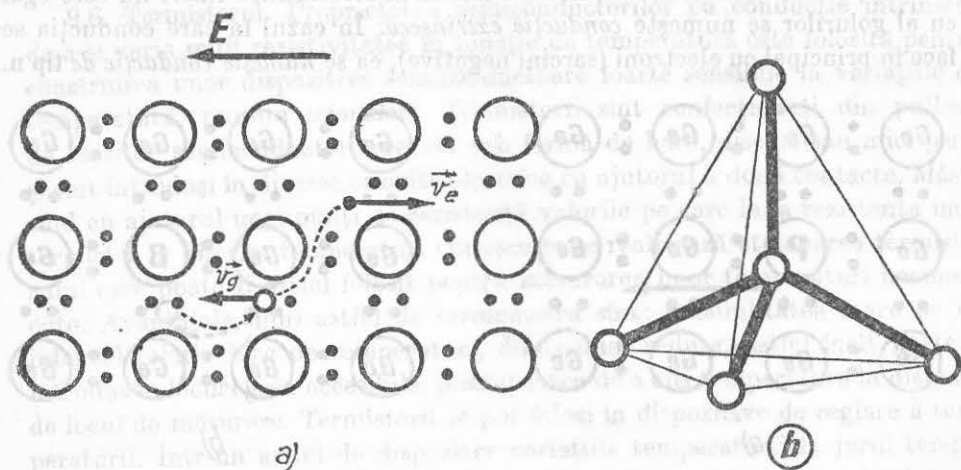


Fig. 9.1

punem că un electron de valență a primit energie egală cu energia de activare și a devenit liber. În locul lui a rămas un loc liber, o legătură chimică nesatisfăcută. Un câmp electric exterior deplasează electronul liber cu viteza v_e în sens contrar cîmpului, dar sub acțiunea aceluiași cîmp se poate deplasa și un electron vecin locului electronic liber, ca să-l ocupe. Apare un alt *loc electronic liber*, ce va fi ocupat de un alt electron legat vecin, deplasat sub acțiunea cîmpului electric ș.a.m.d. Astfel se obține o *deplasare a locului liber în sensul cîmpului*, ca și cum locul liber ar fi o sarcină electrică pozitivă. Așadar și electronii legați pot participa la conducție, cu condiția să existe legături chimice nesatisfăcute. Participarea la conducție a electronilor legați este echivalentă cu cea a unor sarcini pozitive care se deplasează în sensul cîmpului cu viteza v_p . Locurile electronice libere, echivalente din punct de vedere al conducției cu niște sarcini pozitive, se numesc *goluri*.

Așadar în semiconductori participă la conducție două feluri de purtători de sarcină: electronii (negativi) și golurile (pozitive). În semiconductorii puri electronii liberi și golurile apar perechi. Se numesc semiconductori cu *conducție intrinsecă* semiconductorii în care există același număr de electroni și de goluri.

9.5. **Semiconductori cu impurități.** Introducerea unor cantități foarte mici de atomi ai altor elemente în semiconductori poate schimba esențial proprietățile lor electrice. Introducerea de atomi pentavalenți în germaniu duce la apariția unui număr mare de electroni liberi. Elementele din grupa a V-a, de exemplu fosforul, au cinci electroni de valență. Dacă se introduc atomi de fosfor în cristalul de germaniu, numai 4 din acești cinci electroni participă la formarea legăturilor covalente (fig. 9.2, a). Al cincilea electron se desprinde ușor de atom, este cedat cristalului. Elementele introduse în semiconductori, care dau electroni liberi, se numesc *impurități donoare*. Apariția electronilor liberi datorită impurităților donoare nu este însoțită de apariția de goluri. Conducția în semiconductorii în care numărul electronilor liberi nu este egal cu al golurilor se numește *conducție extrinsecă*. În cazul în care conducția se face în principal cu electroni (sarcini negative), ea se numește *conducție de tip n*.

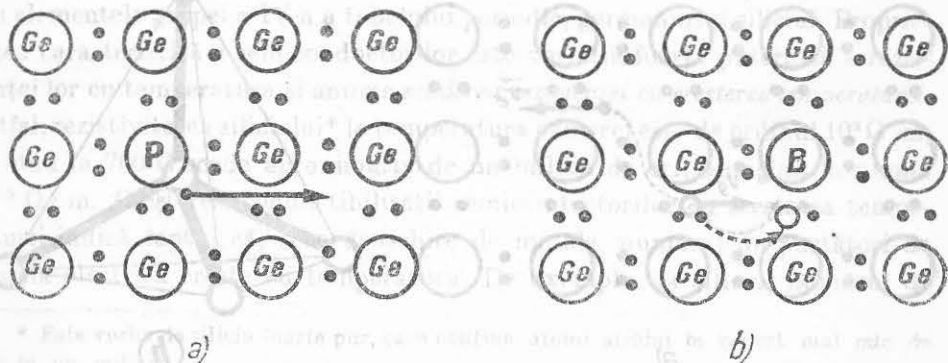


Fig. 9.2

În semiconductorii de tip *n* electronii sînt purtătorii majoritari iar golurile purtătorii minoritari.

Elementele din grupa a III-a, de exemplu borul, au numai trei electroni de valență. Introduși în cristalul de Ge, atomii acestor elemente nu pot completa toate legăturile cu atomii vecini. Una dintre legături rămîne necompletată (fig. 9.2, b). Atomul poate accepta un electron legat de la un atom vecin, în locul căruia apare un gol. Elementele care produc în semiconductori goluri, prin captarea de electroni legați de la atomii vecini, se numesc *impurități acceptoare*. În semiconductorii cu impurități acceptoare conducția este extrinsecă și se numește *conducție de tip p*, deoarece se face în principal prin goluri pozitive. În acești semiconductori purtătorii majoritari sînt golurile, iar electronii sînt purtătorii minoritari.

Cantități foarte mici de impurități donoare sau acceptoare introduse într-un semiconductor pur duc la creșterea considerabilă a conductibilității. Astfel, introducînd în siliciul pur impurități în raport de un atom la un milion de atomi de Si, numărul de purtători la temperatura camerei devine de aproximativ 100 000 de ori mai mare decît numărul de purtători din siliciul pur, ceea ce duce la o creștere a conductibilității tot de aproximativ 100 000 de ori.

Numărul de purtători în semiconductorii cu conducție extrinsecă este determinat de numărul atomilor de impuritate introduși și nu variază cu temperatura. De aceea rezistența acestor semiconductori mai întîi crește cu creșterea temperaturii, ca la metale, ca urmare a intensificării ciocnirilor purtătorilor cu rețeaua cristalină. Situația se schimbă în domeniul temperaturilor foarte mari, cînd se formează un număr mare de perechi de purtători electron-gol, pe seama energiei termice ridicate. În acest caz numărul de perechi electron-gol poate întrece mult numărul atomilor de impuritate și semiconductorul conține practic același număr de electroni și de goluri. La temperaturi foarte înalte conducția devine deci intrinsecă și rezistența scade cu creșterea temperaturii.

9.6. **Termistorul.** Proprietatea semiconductoarelor cu conducție intrinsecă de a-și varia mult rezistivitatea în funcție de temperatură este folosită pentru construirea unor dispozitive semiconductoare foarte sensibile la variațiile de temperatură, numite *termistori*. Termistorii sînt confecționați din pulbere de oxizi de semiconductori presată sub formă de bare, discuri sau mici perle și sînt introduși în diverse circuite electrice cu ajutorul a două contacte. Măsurînd cu ajutorul unei punți de rezistență valorile pe care le ia rezistența unui termistor la diferite temperaturi cunoscute, se realizează etalonarea termistorului care poate fi astfel folosit pentru măsurarea unor temperaturi necunoscute. Avantajele unui astfel de termometru sînt: sensibilitatea mare pe un interval relativ larg de temperaturi, dimensiuni reduse, astfel încît poate fi introdus în locuri greu accesibile, posibilitatea de a citi temperatura la distanță de locul de măsurare. Termistorii se pot folosi în dispozitive de reglare a temperaturii. Într-un astfel de dispozitiv variațiile temperaturii în jurul temperaturii dorite provoacă variații ale rezistenței termistorului, care într-un

montaj special provoacă închiderea sau deschiderea circuitului de încălzire. În felul acesta temperatura se menține automat în jurul unei valori medii dinainte stabilite.

În unele circuite este supărătoare variația rezistențelor metalelor cu temperatura. Rezistența conductorilor metalici crește cu temperatura. Dacă în serie cu o astfel de rezistență se pune un termistor, a cărui rezistență scade cu temperatura, se obține un ansamblu care practic este insensibil la variațiile de temperatură exterioare.

O serie de aplicații ale termistorilor se bazează pe variația rezistențelor lor la încălzirea provocată de trecerea unui curent mare prin ele. S-a constatat că tuburile electronice au o durată de funcționare mai mare dacă la aprindere filamentele sînt încălzite încet. O astfel de încălzire se realizează prin conectarea în serie a unui termistor. Inițial el are o rezistență mare și curentul în circuit este mic. Prin efect Joule termistorul se încălzește, rezistența lui scade și curentul în circuit ajunge la valoarea necesară.

B. DIODA SEMICONDUCTOARE

9.7. Juncțiunea $p-n$. Într-un cristal semiconductor, în care o parte conține impurități acceptoare, iar cealaltă parte impurități donoare (fig. 9.3, *a*), se formează o regiune de tranziție între cele două regiuni, numită juncțiune $p-n$. În juncțiunea $p-n$ se obține o trecere de la conducția de tip p la cea de tip n .

Electronii din partea n difuzează în partea p , unde întilnesc legături chimice nesatisfăcute, goluri. Electronii ocupă locurile libere întilnite în partea p . Procesul prin care dintr-un electron liber și un gol se reface o legătură chimică se numește *recombinare*. Recombinarea este însoțită de degajare de energie. Ca urmare a difuziei electronilor în partea p , partea p , inițial neutră electric, se încarcă negativ, potențialul ei electric scade, iar partea n , inițial neutră electric, rămîne încărcată pozitiv, potențialul ei crește (fig. 9.3, *b*). Între partea n și partea p apare o diferență de potențial de contact U_0 , și un câmp electric îndreptat de la n la p , care se opune deplasării electronilor. Din cauza acestui câmp numai electronii dintr-o mică regiune de lângă juncțiune pot să părăsească partea n . Corespunzător, numai într-o mică regiune din partea p golurile se recombină cu electronii difuzați. În aceste două regiuni practic nu sînt purtători liberi: din partea n au plecat electronii, iar în partea p golurile s-au recombinat cu electronii difuzați. Așadar, de o parte și de alta a juncțiunii $p-n$ se formează o porțiune de cristal sărăcită de purtători liberi, numită strat de baraj. S-a dat denumirea de strat de baraj deoarece acumularea de sarcini de o parte și de alta a juncțiunii $p-n$ creează o diferență de potențial de contact care se opune deplasării electronilor spre partea p și a golurilor spre partea n .

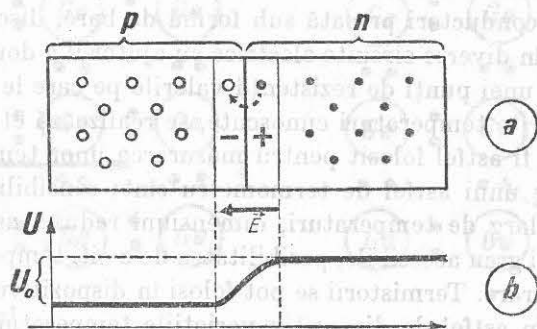


Fig. 9.3

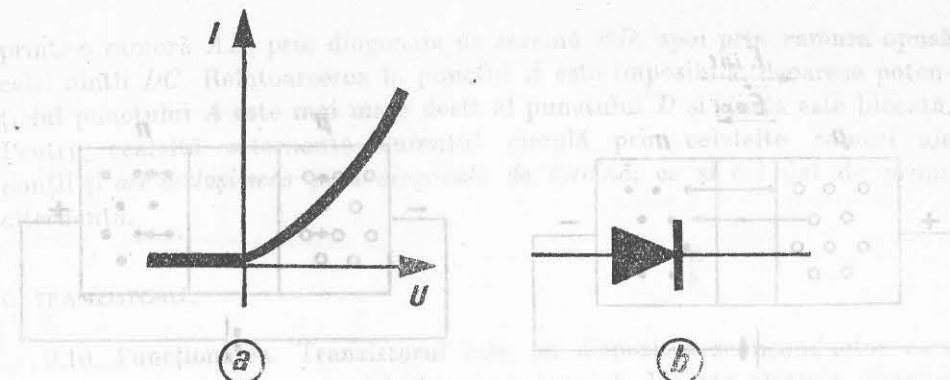


Fig. 9.4

9.8. Trecerea curentului prin juncțiunea $p-n$. Juncțiunea $p-n$ are calități redresoare. Aplicînd o tensiune exterioară continuă pe juncțiune, astfel încît polul pozitiv să fie la partea p și polul negativ la partea n , se constată că prin juncțiune trece curent electric, a cărui intensitate crește cu creșterea tensiunii aplicate. Dacă însă se inversează polaritatea tensiunii exterioare, practic nu trece curent. Caracteristica curent — tensiune se aseamănă cu cea a unei diode (fig. 9.4, *a*). De aceea o juncțiune $p-n$ se mai numește și *diodă semiconductoră*. Reprezentarea convențională a unei astfel de diode este arătată în figura 9.4, *b*. Sensul săgeții indică sensul curentului permis de diodă. Sensul tensiunii exterioare pentru care prin juncțiune trece curent, cu polul pozitiv la partea p și cel negativ la partea n , se numește *sens direct*; sensul pentru care nu trece curent — *sens invers*.

Cîmpul creat de tensiunea directă în stratul de baraj este de sens invers cîmpului stratului de baraj însuși (fig. 9.5, *a*). Cîmpul rezultat din suprapunerea acestor două cîmpuri va fi deci mai mic, electronii din partea n îl pot învinge mai ușor și pot trece spre partea p . Se spune că tensiunea directă *injectează* electroni în partea p . De asemenea tensiunea exterioară directă împinge golurile pozitive dinspre partea p spre partea n , injectînd goluri în partea n . Electronii injectați în partea p sînt acolo purtători minoritari, după cum și golurile injectate în partea n sînt acolo purtători minoritari, prin juncțiune se deplasează purtători de sarcină, deci *trece curent electric*, cu atît mai intens, cu cît tensiunea directă este mai mare. Așadar, trecerea curentului în juncțiunea $p-n$ pe care este aplicată o tensiune directă se datorește injectiei purtătorilor minoritari.

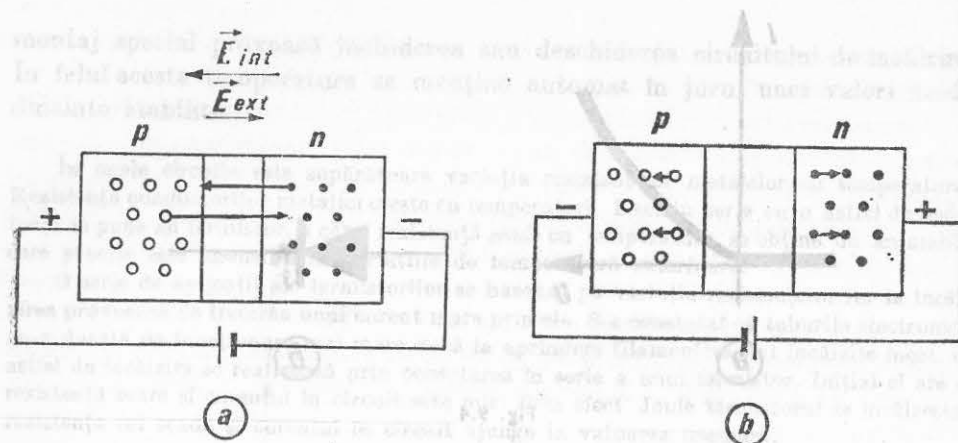


Fig. 9.5

Când se aplică pe joncțiune o tensiune exterioară inversă, cu polul negativ la partea p și cel pozitiv la partea n , electronii din partea n sînt atrași de polul pozitiv, iar golurile din partea p sînt atrase de polul negativ (fig. 9.5, b). Rezultă o lărgire a stratului de baraj, sărăcit de purtători. Prin stratul de baraj nu trec electroni spre polul pozitiv, deoarece în partea p , de unde ar trebui să vină, nu există electroni liberi. De asemenea prin stratul de baraj nu trec goluri spre polul negativ, deoarece în partea n nu sînt goluri. Așadar, cînd se aplică o tensiune inversă, dioda semiconductoră este blocată, prin ea nu circulă curent.

9.9. Redresarea cu diode semiconductoră. Diodele semiconductoră se pot întrebuința pentru redresarea curentului alternativ, ca și o diodă cu emisie termoelectronică. Față de aceasta din urmă diodele semiconductoră prezintă o serie de avantaje: nu necesită circuit de încălzire, au un volum mult mai mic și o durată de funcționare mult mai mare. Dezavantajul principal al diodelor semiconductoră este că își pierde calitățile redresoare la temperaturi mari. La temperaturi suficient de ridicate, atât în partea n , cît și în partea p sînt generate termic foarte multe perechi electron-gol, ambele părți căpătînd conducție intrinsecă. Practic nu mai există nici o deosebire între partea p și partea n și dioda se comportă ca un rezistor.

Pentru redresarea curentului alternativ se pot folosi aceleași scheme ca și în cazul diodelor cu emisie termoelectronică. Pentru redresarea ambelor alternanțe se poate folosi și o schemă cu patru diode așezate în punte. Tensiunea alternativă se aplică pe o diagonală a punții, iar tensiunea redresată se culege pe cealaltă diagonală (fig. 9.6). Pentru o alternanță curentul trece

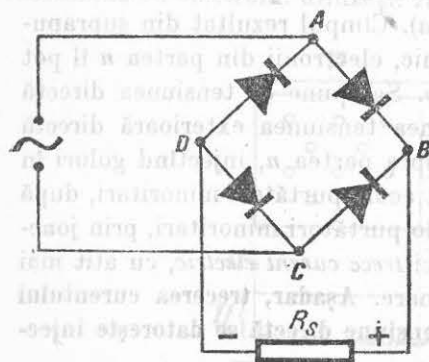


Fig. 9.6

printr-o ramură AB , prin diagonală de sarcină BD , apoi prin ramura opusă celei dinții DC . Reîntoarcerea în punctul A este imposibilă, deoarece potențialul punctului A este mai mare decît al punctului D și dioda este blocată. Pentru cealaltă alternanță curentul circulă prin celelalte ramuri ale punții și are același sens prin diagonală de sarcină, ca și cel dat de prima alternanță.

C. TRANZISTORUL

9.10. Funcționarea. Tranzistorul este un dispozitiv semiconductor care poate înlocui triodele cu emisie termoelectronică. El este alcătuit dintr-un semiconductor cu trei straturi de conducție diferită: un strat n între două straturi p , la tranzistorul numit $p-n-p$ (fig. 9.7, a), sau un strat p între două straturi n , la tranzistorul numit $n-p-n$ (fig. 9.7, b). Vom studia funcționarea tranzistorului $n-p-n$. Stratul din mijloc al semiconductorului se numește *bază*, straturile laterale se numesc *emitor* și *colector*. Tranzistorul poate fi considerat ca format din două diode semiconductoră: una emitor-bază și cealaltă bază-colector (fig. 9.8, a).*

Pentru funcționarea tranzistorului, pe dioda bază-colector se aplică o tensiune inversă, cu polul pozitiv la partea n , adică la colector (fig. 9.8, a). Deoarece în partea p nu sînt electroni liberi care să fie atrași de polul pozitiv de la colector, în circuitul colectorului curentul este practic nul. Dacă în bază se injectează electroni din emitor, prin aplicarea unei tensiuni directe pe dioda emitor-bază, electronii injectați vor fi atrași de colectorul pozitiv și în circuitul colectorului va circula curent. În acest fel curentul în circuitul colectorului este comandat de curentul din circuitul emitorului, care la rîndul său este determinat de tensiunea aplicată între emitor și bază U_{eb} .

Peste anumite valori ale tensiunii bază-colector U_{bc} toți electronii injectați în bază sînt colectați de colector, curentul I_c atinge valori de saturație (fig. 9.8, b) și curentul I_b care circulă între bază și sursa U_{bc} este foarte

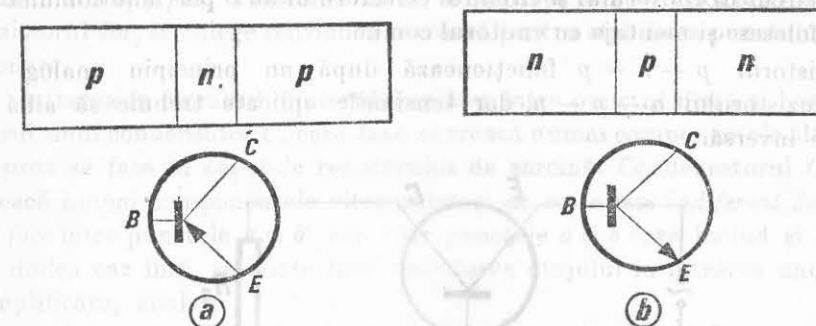


Fig. 9.7

* Săgețile indică electrozii emitorilor, iar sensul lor sensul tensiunii în joncțiunea bază-emitor.

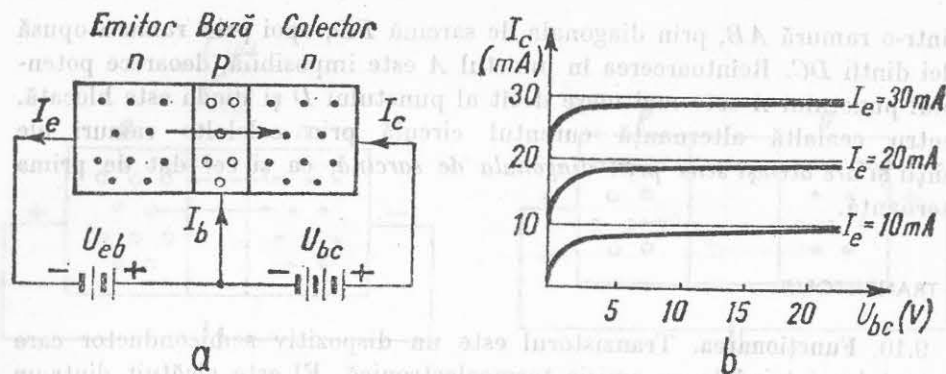


Fig. 9.8

mic. În caracteristicile din figura 9.8, *b* se vede că pe măsură ce crește curentul emitorului I_e , crește și curentul colectorului I_c , iar tensiunea bază-colector U_{bc} practic nu influențează curentul colectorului.

Aplicind între emitor și bază o tensiune alternativă (fig. 9.9), variațiile de tensiune provoacă variații ale curentului emitorului, care produc variații ale curentului colectorului. Pe rezistorul de sarcină R_s , mare, din circuitul colectorului variațiile de curent produc variații de tensiune, mai mari decât ale tensiunii de intrare. Așadar, *tranzistorul poate funcționa ca amplificator de tensiune*.

Pentru ca semnalul amplificat să nu fie deformat, în circuitul emitorului se introduce o tensiune continuă U_0 , care are rolul de a stabili *punctul de funcționare* al tranzistorului: tensiunea U_0 produce un anumit curent de emitor, în jurul căruia se produc variațiile date de tensiunea alternativă. Dacă se alege punctul de funcționare pentru care $I_E = 0$, dioda emitor-bază permite numai trecerea alternanțelor pozitive, pentru care este polarizată direct și deci tranzistorul funcționează ca detector.

Montajul discutat, din figura 9.9, se numește montaj cu bază comună, deoarece circuitul emitorului și circuitul colectorului au o porțiune comună — baza. Se folosesc și montaje cu emitorul comun.

Tranzistorul $p-n-p$ funcționează după un principiu analog cu cel al tranzistorului $n-p-n$, dar tensiunile aplicate trebuie să aibă o polaritate inversă.

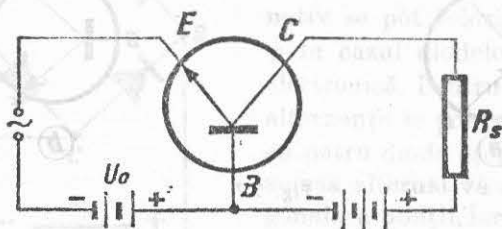


Fig. 9.9

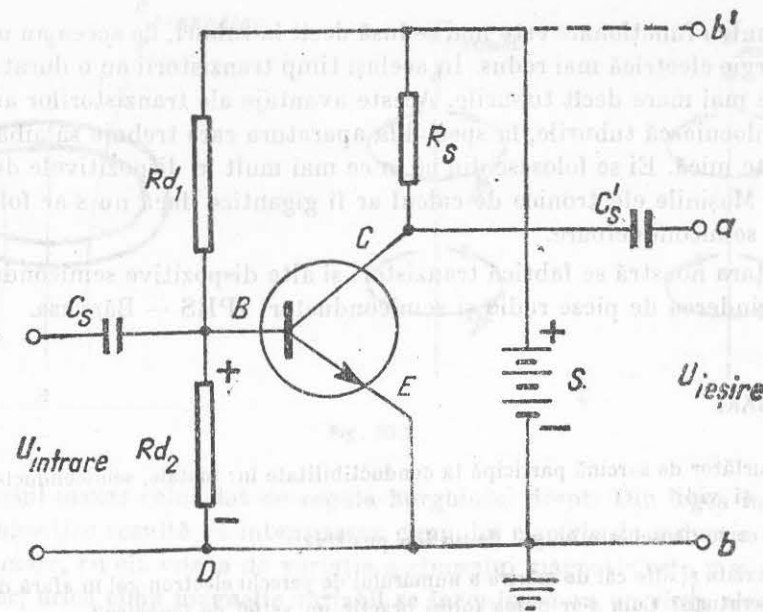


Fig. 9.10

9.11. Etaj de amplificare. Schema unui etaj de amplificare cu un tranzistor montat cu emitorul comun este arătată în figura 9.10. În acest montaj funcționarea tranzistorului este analoagă cu a unei triode. Electronii sînt emiși de emitor, controlați de tensiunea aplicată bazei și colectați de colector. Circuitul *EDBE* este al bazei, iar circuitul *ECSE* este al colectorului. Pe dioda bază-colector se aplică tensiune inversă de la sursa S . O parte din tensiunea sursei se aplică rezistenței de sarcină și o mică parte diodei emitor-bază. Deoarece tensiunea directă aplicată în felul acesta pe dioda emitor-bază nu este suficientă pentru stabilirea punctului de funcționare, pe dioda emitor-bază se aplică o tensiune mai mare cu ajutorul unui divizor de tensiune format din rezistorii R_{d1} și R_{d2} . Tensiunea sursei se împarte pe acești doi rezistori și de pe rezistorul R_{d2} se culege tensiunea necesară pentru stabilirea punctului de funcționare.

Intrarea în circuitul emitorului se face între punctul masă și bază cu ajutorul unui condensator C_s , care lasă să treacă numai componentele alternative. Ieșirea se face la capetele rezistorului de sarcină. Condensatorul C_s lasă să treacă numai componentele alternative și de aceea este indiferent dacă ieșirea se face între punctele a și b' , sau între punctele a și b care includ și sursa. În al doilea caz însă, se poate face conectarea etajului la intrarea unui etaj de amplificare, analog.

9.12. Importanța practică. Apariția tranzistorilor și a celorlalte dispozitive semiconductoare a adus schimbări importante în radiotehnică. Tranzistorii ocupă un volum mic și se poate realiza miniaturizarea aparaturii. Ei nu necesită alimentare pentru circuite de încălzire, iar tensiunea continuă nece-

sară pentru funcționare este mai redusă decât la tuburi, de aceea au un consum de energie electrică mai redus. În același timp tranzistorii au o durată de funcționare mai mare decât tuburile. Aceste avantaje ale tranzistorilor au făcut ca ei să înlocuiască tuburile, în special la aparatura care trebuie să aibă volum și greutate mică. Ei se folosesc din ce în ce mai mult în dispozitivele de automatizare. Mașinile electronice de calcul ar fi gigantice dacă nu s-ar folosi dispozitive semiconductoare.

În țara noastră se fabrică tranzistori și alte dispozitive semiconductoare la întreprinderea de piese radio și semiconductori IPRS — Băneasa.

INTREBĂRI

1. Ce purtător de sarcină participă la conductibilitate în: metale, semiconductori, lichide, gaze și vid?
2. Prin ce se deosebește un gol de un ion pozitiv?
3. Pot exista și alte căi de mărire a numărului de perechi electron-gol în afară de creșterea temperaturii? Cum s-ar putea folosi practic un astfel de fenomen?
4. În ce constă influența temperaturii asupra proprietăților tranzistorilor?
5. Un semiconductor conține impurități donoare și un număr mic de impurități acceptoare. În el există și electroni și goluri sau numai electroni? Ce se întâmplă cu purtătorii minoritari injectați prin aplicarea unei tensiuni directe? După dispariția lor prin recombinare, cum mai trece curentul electric?
6. Diode semiconductoare de un anumit tip pot suporta tensiuni până la 40 V. Cum se pot lega mai multe astfel de diode, ca ele să redreseze tensiuni de 100 V?
7. Să se explice funcționarea unui tranzistor $p - n - p$.
8. Poate funcționa un tranzistor care are o distanță mare între joncțiunea emitorului și cea a colectorului?

10. UNDE ELECTROMAGNETICE

10.1. Câmpul electromagnetic. Studiul fenomenelor electromagnetice a arătat că între câmpul electric și cel magnetic există o strinsă legătură. Astfel, legea inducției electromagnetice arată că un câmp magnetic variabil în timp înălțuit de o spirală dă naștere în spirală unei tensiuni electromotoare de inducție. În spira închisă apare un curent electric. Electronii sînt deplasați cu viteza v de-a lungul spirei de câmpul electric $\vec{E}$, ce apare datorită câmpului magnetic variabil (fig. 10.1, a). Apariția câmpului electric de inducție nu este legată de existența spirei: el apare ori de cîte ori câmpul magnetic variază, chiar dacă nu există o spirală în care să se producă curent electric sub acțiunea lui. Câmpul electric de inducție are linii de câmp închise și este perpendicular pe câmpul magnetic variabil care-i dă naștere (fig. 10.1, b). Dacă B este descrescător, sensul câmpului electric este dat de regula burghiului drept, iar dacă B este crescător,

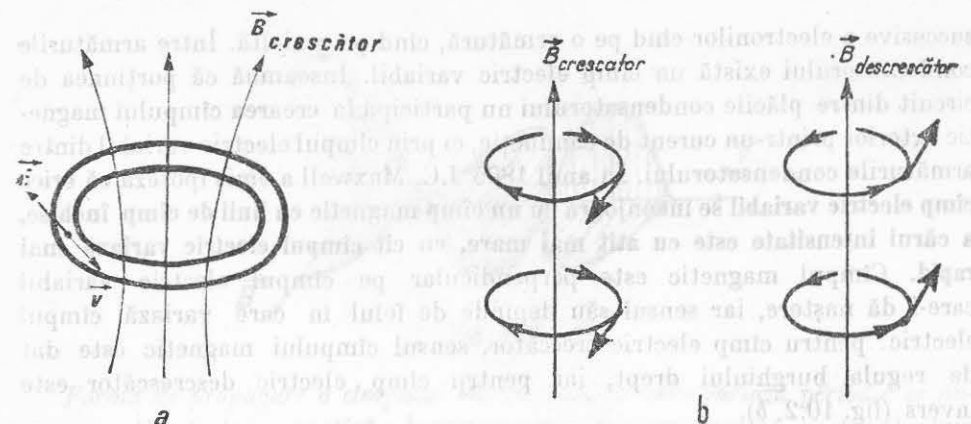


Fig. 10.1

E are sensul invers celui dat de regula burghiului drept. Din legea inducției electromagnetice rezultă că intensitatea câmpului electric de inducție este cu atât mai mare, cu cît viteza de variație a câmpului magnetic este mai rapidă.

Așadar, orice câmp magnetic variabil se înconjoară cu un câmp electric cu linii de câmp închise, a cărui intensitate este cu atât mai mare, cu cît câmpul magnetic variază mai rapid.

Se pune problema dacă legătura dintre câmpul magnetic și cel electric este reciprocă și anume dacă un câmp electric poate genera un câmp magnetic și în ce condiții. Un curent electric ce trece printr-un conductor generează în jurul conductorului un câmp magnetic. Dacă circuitul conține un condensator C (fig. 10.2, a), el poate fi străbătut de un curent alternativ, care generează un câmp magnetic. „Închiderea” curentului alternativ prin condensator nu se datorește deplasării de sarcini în interiorul condensatorului, ci acumulării

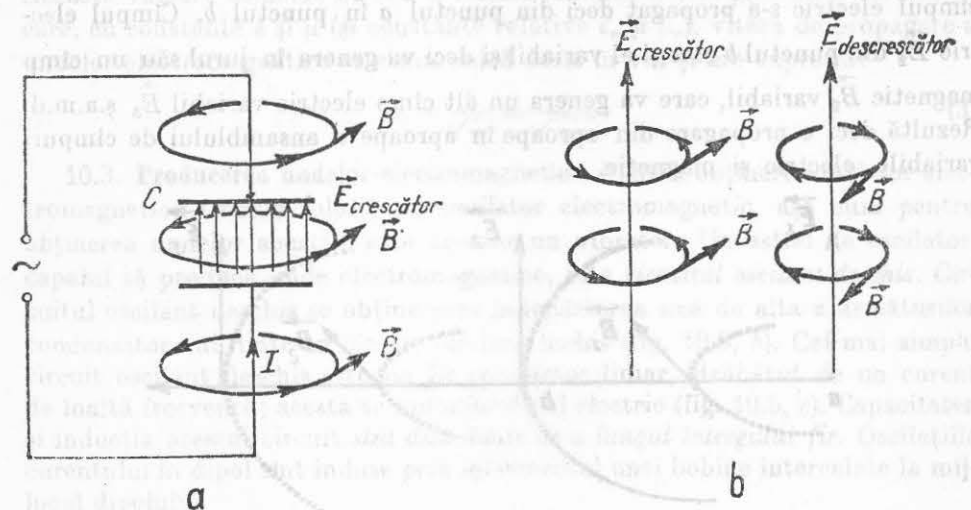


Fig. 10.2

successive a electronilor cînd pe o armătură, cînd pe cealaltă. Între armăturile condensatorului există un cîmp electric variabil. Înseamnă că porțiunea de circuit dintre plăcile condensatorului nu participă la crearea cîmpului magnetic exterior printr-un curent de conducție, ci prin cîmpul electric variabil dintre armăturile condensatorului. În anul 1865 J.C. Maxwell a emis ipoteza că orice cîmp electric variabil se înconjoară cu un cîmp magnetic cu linii de cîmp închise, a cărui intensitate este cu atît mai mare, cu cît cîmpul electric variază mai rapid. Cîmpul magnetic este perpendicular pe cîmpul electric variabil care-i dă naștere, iar sensul său depinde de felul în care variază cîmpul electric: pentru cîmp electric crescător, sensul cîmpului magnetic este dat de regula burghiului drept, iar pentru cîmp electric descrescător este invers (fig. 10.2, b).

Așadar, între cîmpul electric și cel magnetic există o profundă legătură, care se manifestă prin generarea unuia din ele datorită variației celui alt. *Ansamblul cîmpurilor electric și magnetic, care oscilează și se generează reciproc, se numește cîmp electromagnetic.* Teoria cîmpului electromagnetic a fost elaborată de Maxwell și a fost pe deplin confirmată de experiențe. Una din consecințele importante ale acestei teorii a fost precizarea existenței undelor electromagnetice, descoperite experimental de H. Hertz, în anul 1887.

10.2. Propagarea. Una dintre proprietățile importante ale cîmpului electromagnetic este capacitatea lui de a se propaga în spațiu. Într-un cîmp electromagnetic ce se propagă, ambele cîmpuri ce-l formează, electric și magnetic, variază periodic în timp. Să examinăm propagarea unui cîmp electric periodic $\vec{E}_1$, cu o variație sinusoidală în timp, care generează în jurul său un cîmp magnetic periodic $\vec{B}_1$ (fig. 10.3). Cîmpul magnetic $\vec{B}_1$, fiind variabil, va genera în jurul său un cîmp electric $\vec{E}_2$. Prin intermediul cîmpului magnetic $\vec{B}_1$, cîmpul electric s-a propagat deci din punctul *a* în punctul *b*. Cîmpul electric $\vec{E}_2$ din punctul *b* este și el variabil și deci va genera în jurul său un cîmp magnetic $\vec{B}_2$ variabil, care va genera un alt cîmp electric variabil $\vec{E}_3$ ș.a.m.d. Rezultă deci o propagare din aproape în aproape a ansamblului de cîmpuri variabile, electric și magnetic.

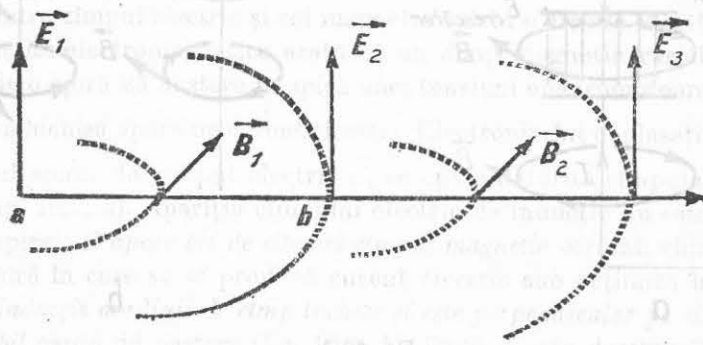


Fig. 10.3

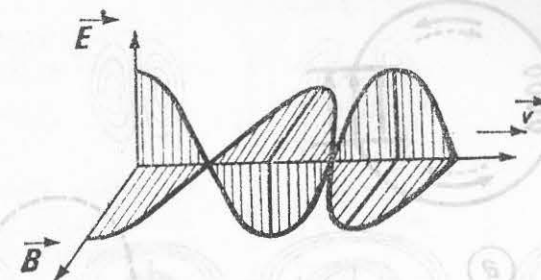


Fig. 10.4

Forma de propagare a cîmpului electromagnetic care variază periodic se numește undă electromagnetică. Într-o undă electromagnetică vectorul cîmp electric $\vec{E}$ și vectorul cîmp magnetic $\vec{B}$ oscilează în plane perpendiculare între ele și perpendiculare pe viteza de propagare a undei $\vec{v}$ (fig. 10.4). Vectorii $\vec{E}$, $\vec{B}$ și $\vec{v}$ formează un triedru drept. Cîmpul electric și cîmpul magnetic oscilează în fază, ele trec simultan prin valorile maxime și minime.

Viteza *c* a undelor electromagnetice în vid a fost găsită teoretic de Maxwell:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (1)$$

unde ϵ_0 este permitivitatea vidului, iar μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului. Din formula (1) se poate obține valoarea vitezei undelor electromagnetice în vid:

$$c = \frac{1}{\sqrt{8,8 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}. \quad (2)$$

Această valoare coincide cu cea a vitezei luminii în vid. Într-un mediu oarecare, cu constante ϵ și μ (și constante relative ϵ_r și μ_r), viteza de propagare a undelor electromagnetice este mai mică decît în vid și are expresia:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\epsilon_r \mu_r}. \quad (3)$$

10.3. Producerea undelor electromagnetice. Pentru obținerea undelor electromagnetice trebuie folosit un oscilator electromagnetic, așa cum pentru obținerea undelor acustice este necesar un vibrator. Un astfel de oscilator, capabil să producă unde electromagnetice, este *circuitul oscilant deschis*. Circuitul oscilant deschis se obține prin îndepărtarea una de alta a armăturilor condensatorului dintr-un circuit oscilant închis (fig. 10.5, b). Cel mai simplu circuit oscilant deschis este un fir conductor liniar, străbătut de un curent de înaltă frecvență; acesta se numește dipol electric (fig. 10.5, c). Capacitatea și inducția acestui circuit sînt distribuite de-a lungul întregului fir. Oscilațiile curentului în dipol sînt induse prin intermediul unei bobine intercalate la mijlocul dipolului.

În circuitul oscilant închis (fig. 10.5, a) cîmpul electric are valori mari în spațiul îngust dintre armăturile condensatorului, iar cîmpul magnetic, în inte-

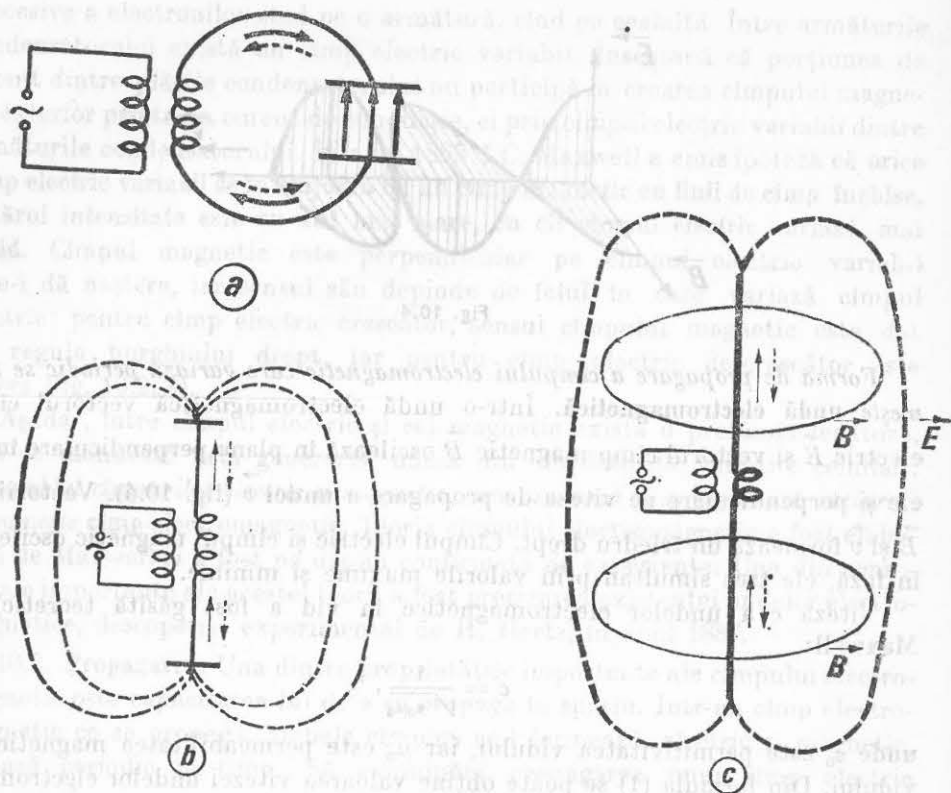


Fig. 10.5

riorul bobinei. Cîmpul magnetic ce ar putea fi creat la distanțe mari în spațiul din jurul conductorilor de legătură este îndreptat în sensuri opuse pentru porțiuni opuse ale circuitului corespunzător sensului curentului în circuit (reprezentat în figura 10.5 prin săgeți continue în prima jumătate de perioadă și săgeți punctate în cea de-a doua). Cîmpul magnetic rezultat în exteriorul circuitului este neglijabil. Circuitul oscilant închis nu radiază practic unde electromagnetice în spațiul înconjurător.

La dipolul electric (fig. 10.5, c) cîmpul electric nu mai este concentrat într-un spațiu îngust, ci ocupă o regiune mare în jurul dipolului. Cîmpul magnetic produs de diferite porțiuni ale cîmpului nu se mai anulează, deoarece are același sens pentru orice porțiuni de circuit. Așadar, în spațiul din jurul dipolului electric există cîmp electromagnetic, care oscilează periodic, cu frecvența curentului din dipol.

Peste cîmpul electric produs de sarcinile acumulate pe dipol se suprapune cîmpul electric produs de variația în timp a cîmpului magnetic produs de dipol. Din suprapunerea acestor două cîmpuri rezultă un cîmp electric cu linii de cîmp închise (momentul $t = \frac{T}{2}$, fig. 10.6). După o jumătate de perioadă acest proces se repetă dar sensul cîmpurilor se inversează (momentul $t = T$) (fig. 10.6). Cîmpul electric cu linii de cîmp închise nu mai este legat de dipol.

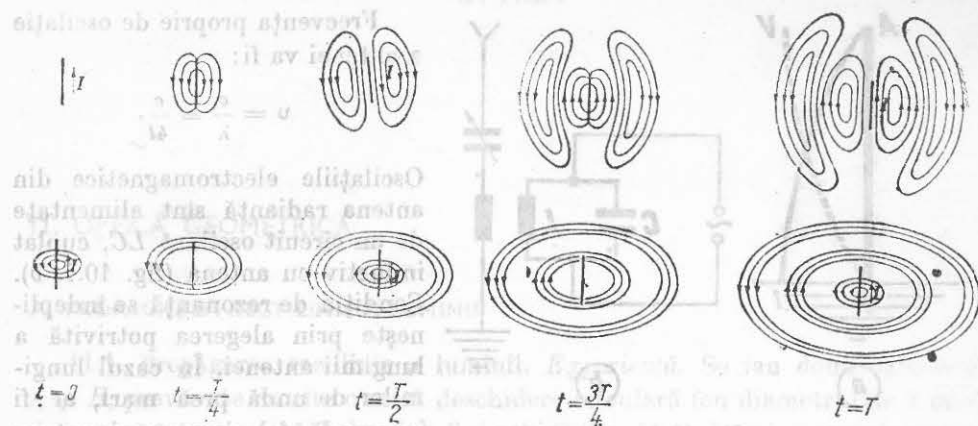


Fig. 10.6

Oscilațiile acestui cîmp, în interdependență cu oscilațiile cîmpului magnetic, se propagă în spațiu după mecanismul cunoscut (10.2). **Dipolul electric radiază în spațiu unde electromagnetice, care transportă energie.**

La aceeași intensitate a curentului din dipol, energia radiată de dipol prin unde electromagnetice este cu atât mai mare, cu cât frecvența de oscilație este mai mare. Explicația constă în faptul că intensitatea cîmpului electric (magnetic) generat prin variațiile cîmpului magnetic (electric) — deci energia transportată de unde electromagnetice — este cu atât mai mare, cu cât variațiile respective sînt mai rapide.

10.4. Antena. Antena este un circuit oscilant deschis, folosit pentru a radia în spațiu, sau pentru a recepționa unde electromagnetice de o anumită frecvență. Pentru ca energia undelor electromagnetice să aibă valori mari este necesar ca oscilațiile electromagnetice produse în antenă să fie maxime. Aceasta se realizează cînd frecvența proprie de oscilație a antenei este egală cu frecvența oscilațiilor cu care este excitată. Antena este deci un circuit oscilant deschis în care inductanța și capacitatea sînt repartizate uniform de-a lungul firului, ce are o *frecvență proprie de oscilație*. Cea mai simplă antenă constă dintr-un fir conductor vertical, legat cu unul din capete la pămînt (fig. 10.7, a). Oscilațiile electromagnetice proprii ale antenei se comportă analog oscilațiilor mecanice ale unei coloane de aer dintr-un tub închis la un capăt și deschis la celălalt, adică sînt unde staționare. La capătul P al antenei legat la pămînt se formează un nod pentru potențial, deoarece potențialul pămîntului este nul și un ventru de curent, deoarece electronii se pot scurge din (sau în) pămînt. La capătul A se formează un nod pentru curent $I = 0$ la orice moment, deoarece electronii nu mai au unde să se scurgă și un ventru de potențial (potențialul punctului A este negativ sau pozitiv, după cum se acumulează sau pleacă electronii). Repartiția potențialului de-a lungul antenei este reprezentată de curba punctată VP , iar a curentului de curba AJ (fig. 10.7, a). Lungimea l a antenei este egală cu un sfert din lungimea de undă a radiației electromagnetice radiate de ea:

$$l = \frac{\lambda}{4} \quad (8)$$

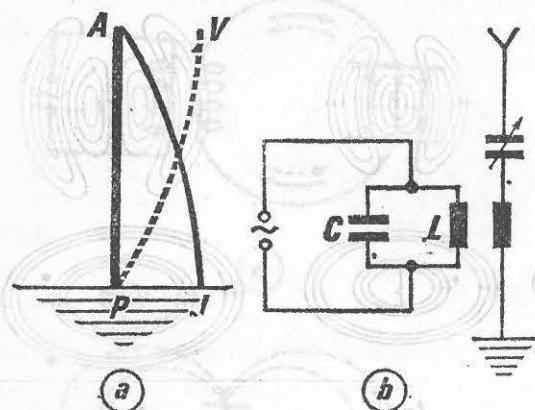


Fig. 10.7

introduce în circuitul antenei o bobină, care are același efect ca și mărirea lungimii antenei. Un condensator introdus în circuitul antenei are același efect ca și micșorarea lungimii antenei. De obicei se introduce în circuitul antenei un condensator variabil (fig. 10.7, b) pentru a acorda antena pe frecvența dorită.

10.5. Proprietățile undelor electromagnetice. Undele electromagnetice au fost puse în evidență pe cale experimentală pentru prima dată de H. Hertz (1883). Undele electromagnetice folosite în radiocomunicații au primit numele de unde herțiene. După lungimea lor de undă sau după frecvența lor, undele herțiene au fost împărțite în mai multe grupe, ca în tabelul următor:

Lungimea de undă λ	Frecvența	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 ultracurte (metriche)
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 pot fi și de alte frecvențe decât cele din tabel. În propagarea lor, *undele electromagnetice se pot reflecta*. Ele sînt reflectate mai ales de suprafața metalelor, a pămîntului, de apa oceanelor etc. Undele scurte sînt reflectate de ionosferă. Pentru undele scurte și foarte scurte, folosite în televiziune și în radar se construiesc reflectoare metalice cu dimensiuni de ordinul lungimilor de undă. Ele concentrează undele electromagnetice într-o anumită direcție.

Undele lungi și medii pot ocoli obstacole foarte mari și chiar munți. Undele scurte și ultracurte se propagă practic rectiliniu. De aceea, pentru televiziune sînt necesare posturi de retransmisie.

Frecvența proprie de oscilație a antenei va fi:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4l}$$

Oscilațiile electromagnetice din antena radiantă sînt alimentate de un circuit oscilant LC, cuplat inductiv cu antena (fig. 10.7, b). Condiția de rezonanță se îndeplinește prin alegerea potrivită a lungimii antenei. În cazul lungimilor de undă prea mari, ar fi incomodă folosirea unei antene exagerat de lungă și atunci se

OPTICĂ

11. OPTICĂ GEOMETRICĂ

A. PROPAGAREA RECTILINIE A LUMINII

11.1. Propagarea rectilinie a luminii. Experiență. Se iau două cartonase A și B, prevăzute cu câte o mică deschidere circulară (cu diametrul de 1 mm) și se așază între o sursă de lumină S și ochi O (fig. 11.1). Lumina se vede numai dacă ochiul, deschiderile și sursa sînt coliniare.

Această experiență, ca și numeroase alte observații, arată că:

• Într-un mediu transparent și omogen¹ lumina se propagă în linie dreaptă.

Linia dreaptă după care se propagă lumina se numește *rază de lumină*.

În studiul opticii geometrice, propagarea razelor de lumină este descrisă pe baza următoarelor principii:

1) *Propagarea rectilinie a luminii în medii transparente și omogene* (principiu menționat mai înainte);

2) *Independența razelor de lumină*. Cînd două sau mai multe raze de lumină se intersectează, ele rămîn neschimbate ca direcție.

3) *Reversibilitatea razelor de lumină*. O rază de lumină poate fi parcursă de lumină în ambele sensuri, fie în sensul de la A la B, fie în sensul de la B la A.

11.2. Fascicule de lumină. Un mănunchi de raze de lumină se numește *fascicul de lumină* (fig. 11.2).

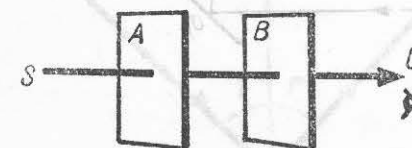


Fig. 11.1 Lumina se propagă în linie dreaptă.

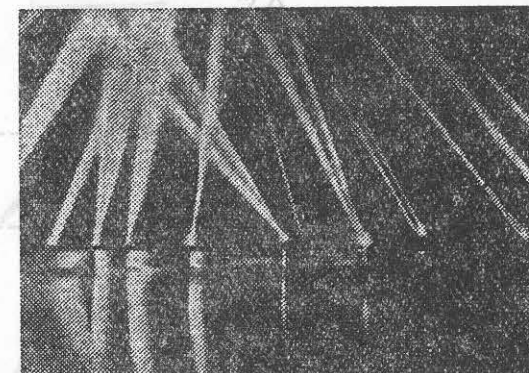


Fig. 11.2. Fascicule de lumină provenite de la proiectoare.

¹ Un mediu este *omogen* cînd toate elementele sale de volum au aceleași proprietăți.

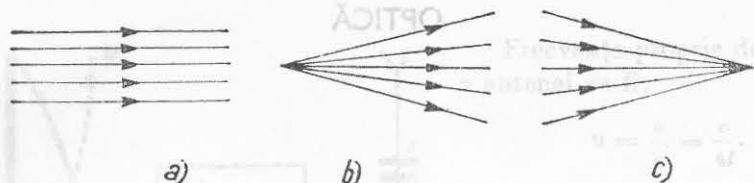


Fig. 11.3 Fascicule luminoase: a) paralel; b) divergent; c) convergent.

Fasciculul de lumină se numește *paralel* (sau *cilindric*) (fig. 11.3, a), dacă razele lui sînt paralele, de exemplu razele de lumină care vin de la o sursă ce este la o foarte mare distanță de ochiul nostru. Practic se poate considera paralel fasciculul provenit de la o stea.

Dacă razele de lumină pornesc dintr-un punct comun, de exemplu în cazul unei surse luminoase punctiforme¹ (un punct luminos), fasciculul se numește *divergent* (fig. 11.3, b).

În fine, dacă se așază în drumul razelor de lumină o lentilă convergentă, ele se întîlnesc într-un punct; fasciculul se numește *convergent* (fig. 11.3, c).

O consecință a propagării rectilinii a luminii este fenomenul de *umbră* și *penumbră*. Formarea umbrelor explică eclipsele de Lună și de Soare.

11.3. Viteza luminii. În decursul timpului, viteza luminii a fost determinată prin diferite metode astronomice și fizice.

A. Michelson (1852–1931) în 1926 a determinat experimental viteza luminii, folosind o oglindă prismatică octogonală rotitoare *P* (fig. 11.4).

Lumina care vine de la sursa *S* cade pe fața 1 a oglinzii *P* (oglinza este în repaus), se reflectă pe oglinzile *O*₁ și *O*₂ și apoi pe fața 3 a prisme, astfel că imaginea sursei *S* se formează în *S'* (spre exemplu, în ochiul unui observator).

Dacă se rotește prisma, raza reflectată pe fața 3 nu va mai cădea în ochiul observatorului. Se mărește treptat turajia prisme, pînă cînd la un număr *n* de rotații pe secundă, imaginea devine iarăși vizibilă. Aceasta înseamnă că în timpul cît lumina parcurge distanța $2l$, fața 3 este înlocuită de următoarea (adică de fața 2), deci prisma face în acest timp $1/8$ din rotația completă.

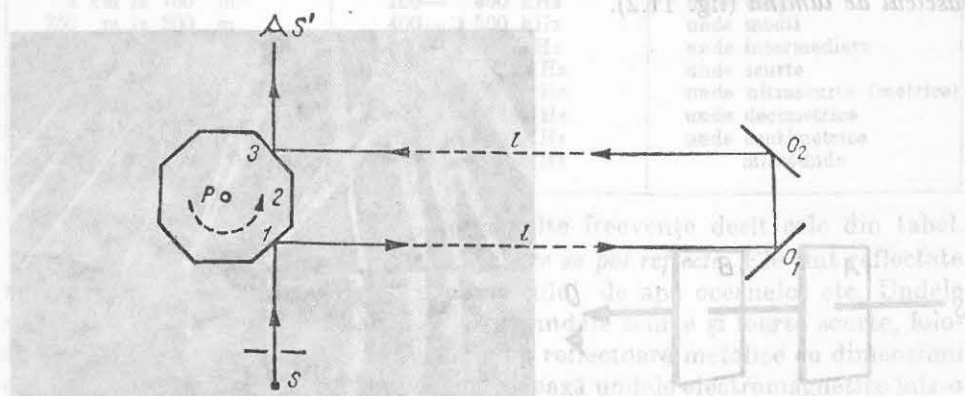


Fig. 11.4. Determinarea vitezei luminii.

¹ O sursă de lumină este *punctiformă*, cînd dimensiunile ei sînt mici în comparație cu distanța de la care se observă efectele.

Timpul în care o față este înlocuită de următoarea este $\frac{1}{8n}$ s. În acest timp, lumina a parcurs distanța cunoscută $2l$; acest timp este $\frac{2l}{v}$, unde *v* este viteza luminii în aer, adică:

$$\frac{2l}{v} = \frac{1}{8n} \text{ sau } v = 16nl.$$

Cunoscînd distanța $l = 35,4$ km (distanța dintre vîrfurile a doi munți: Wilson și San Antonio din California) și $n = 528$ rot/s, Michelson a calculat viteza luminii în aer și, făcînd corecția necesară, a găsit pentru viteza luminii în vid valoarea $c = 299\,796 \pm 4$ km/s.

• Viteza luminii în vid și, cu aproximație, în aer se ia:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

B. REFLEXIA LUMINII

11.4. Reflexia luminii și legile ei. Dacă o rază de lumină *SI* întîlnește în *I* o suprafață plană lucioasă *O* (o oglindă plană) (fig. 11.5), ea își schimbă direcția, întorcîndu-se în mediul din care a venit, pe drumul *IR*; acest fenomen se numește *reflexia luminii*.

Raza *SI* este *raza incidentă*, punctul *I* este *punctul de incidență*, raza *IR* este *raza reflectată*. Planul format de raza incidentă *SI* și perpendiculara — sau *normala* — *IN*, ridicată din punctul *I* pe planul oglinzii, este *planul de incidență*.

Unghiul *i*, format de raza incidentă cu normala, este *unghiul de incidență*, iar unghiul *r*, format de raza reflectată cu normala, este *unghiul de reflexie*.

Se demonstrează experimental, spre exemplu cu *discul optic* (fig. 11.6), două legi ale reflexiei:

- 1) Raza incidentă, raza reflectată și normala sînt în același plan.
- 2) Unghiul de reflexie este egal cu unghiul de incidență.

$$r = i$$

(1)

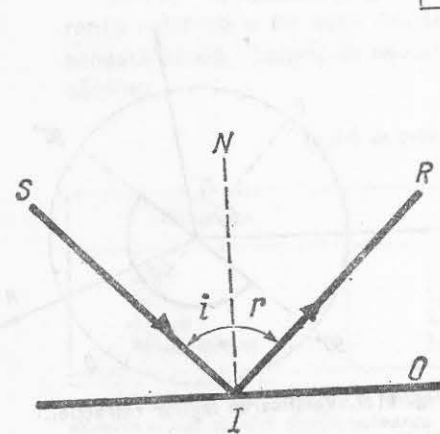


Fig. 11.5. Reflexia luminii.

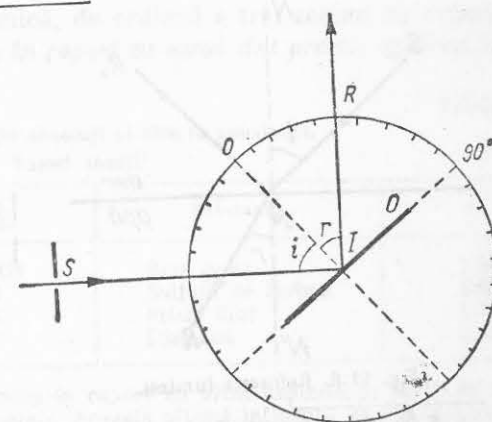


Fig. 11.6. Verificarea legilor reflexiei cu discul optic.

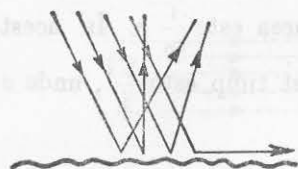


Fig. 11.7. Difuzia luminii.

Dacă unghiul de incidență este nul, adică raza incidentă este normală pe oglindă, raza reflectată coincide cu raza incidentă.

Conform legilor reflexiei, razele reflectate care corespund unor raze incidente paralele, ce cad pe o suprafață plană și lucioasă, sînt și ele paralele.

Dacă aceleași raze cad pe o suprafață cu asperități, razele reflectate nu mai sînt paralele (fig. 11.7); acest fenomen se numește *împrăștierea luminii* (sau *difuzia luminii*) și ne dă posibilitatea să distingem conturul obiectelor înconjurătoare*. Dacă obiectele ar avea suprafața lucioasă, nu am putea să vedem detaliile de pe acestea decît în direcția razelor reflectate.

C. REFRACTIA LUMINII

11.5. Refracția luminii și legile ei. Fie un fascicul de lumină care cade pe suprafața unei ape (fig. 11.8). La suprafața de separare a celor două medii transparente (aer și apă), fasciculul se împarte în două: unul, situat în aer, este fasciculul reflectat, altul în apă, este *fasciculul refractat*.

Se constată, de asemenea, că direcția fasciculului refractat este diferită de aceea a fasciculului incident; în experiența descrisă mai sus, el este mai aproape de normala NN' .

Schimbarea bruscă a direcției de propagare a luminii cînd traversează suprafața de separare a două medii se numește refracție. O astfel de suprafață se numește suprafață *refrindentă*.

Se demonstrează experimental cu ajutorul discului optic (fig. 11.9) că razele de lumină urmează două *legi ale refracției*, stabilite de W. Snell (1591—1626) și René Descartes (1596—1650):

- 1) Raza incidentă, raza refractată și normala sînt în același plan.
- 2) Raportul dintre sinusul unghiului de incidență și sinusul unghiului de refracție este o constantă caracteristică celor două medii transversate de raze.

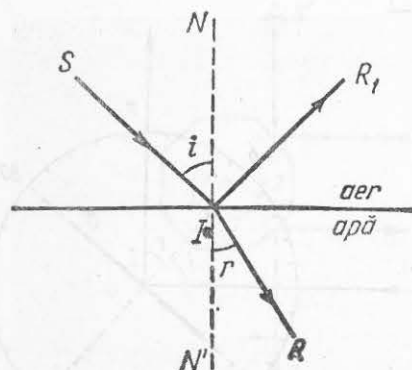


Fig. 11.8. Refracția luminii.

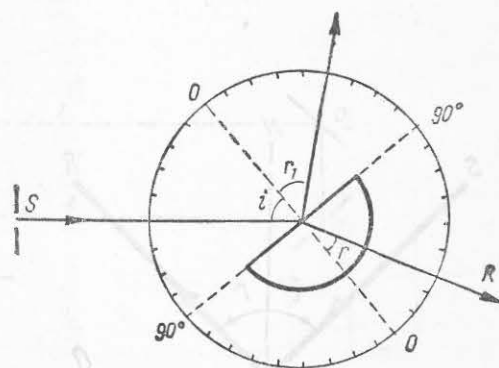


Fig. 11.9. Verificarea legilor refracției.

* În fiecare punct al suprafeței cu asperități se poate înlocui această suprafață prin planul tangent, care are, în acel punct, rolul unei oglinzi plane.

11.6. Indice de refracție. Dacă i este unghiul de incidență, iar r unghiul de refracție (fig. 11.8), conform legii a doua a refracției se poate scrie:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} \quad (1)$$

unde n_{21} se numește *indice de refracție relativ al mediului în care se propagă lumina refractată în raport cu cel al mediului din care vine lumina incidentă*; sau cu alte cuvinte n_{21} este *indicele de refracție al mediului al doilea în raport cu primul*.

Indicele de refracție al oricărui mediu față de vid se numește *indice de refracție absolut* al mediului dat.

C. Huygens (1929—1965) a demonstrat că unghiurile i și r sînt legate de vitezele de propagare a luminii în mediile 1 și 2 prin relația:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

Dacă se notează cu c viteza luminii în vid și cu v_1 viteza luminii în mediul 1, atunci indicele de refracție absolut al mediului 1 este:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad (3, a)$$

Analog, indicele de refracție absolut al mediului 2 este:

$$n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (3, b)$$

Divizînd membru cu membru relația (3, b) prin (3, a) se obține:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

și dacă se ține seamă de (2), legea a doua a refracției se scrie:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (4)$$

Viteza v a luminii în aer este inferioară vitezei c a luminii în vid, dar diferența relativă a lor este foarte mică, de ordinul a trei zecimi de miimi. Din această cauză, *indicii de refracție în raport cu aerul sînt practic egali cu indicii absoluți*.

Tabelul 11.1

Indici de refracție absoluți ai citorva substanțe.
Valori medii¹

Substanța	n	Substanța	n
Aer ²	1,0003	Sare gemă	1,54
Apă	1,33	Sulfură de carbon	1,63
Alcool	1,36	Sticlă flint	1,76
Sticlă crown	1,52	Diamant	2,42

¹ Indicii de refracție a unui mediu în raport cu altul depinde, în afară de natura acestor două medii, și de *culoarea luminii*. Această ultimă influență va fi examinată mai tîrziu (§ 11.11), cînd se va studia *dispersia luminii*, care însoțește refracția, dar se poate observa din (2) că n depinzînd de vitezele în cele două medii depinde implicit de lungimile de undă ale radiației în mediile respective.

² În condiții normale de temperatură și presiune.

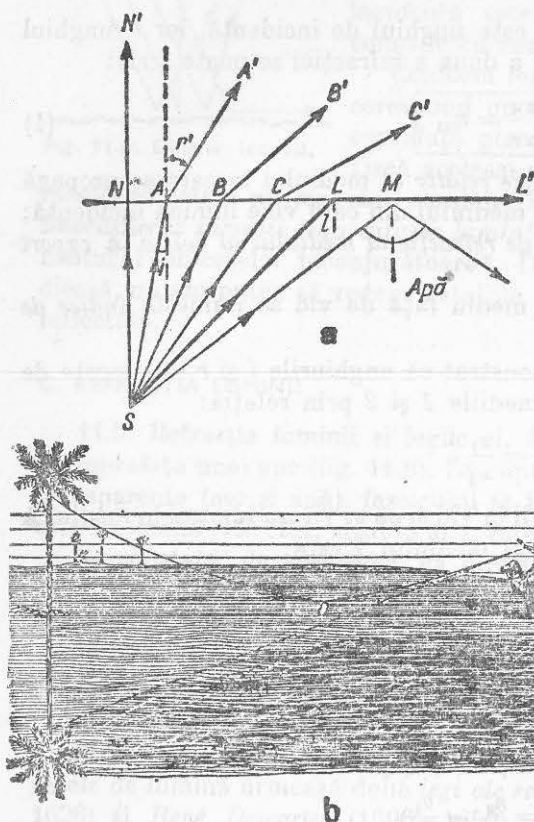


Fig. 11.10. a - Reflexia totală; b - Mirajul.

— Dacă se mărește unghiul de incidență, peste valoarea unghiului limită l , raza de lumină SM nu se mai refractă, ci se reflectă total în mediul din care a venit (apă). Acest fenomen se numește **reflexie totală**.

Relația dintre unghiul limită și indicele de refracție se obține din (4), unde $i = r'$ și $r = i'$, deoarece se consideră că raza de lumină trece din apă în aer (fig. 11.10):

$$n_1 \sin r' = n_2 \sin i'$$

sau

$$\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_{21}},$$

în care dacă se înlocuiește $i' = l$ și $r' = 90^\circ$ se obține:

$$\sin l = \frac{1}{n_{21}}, \quad (5)$$

adică: **sinusul unghiului limită este inversul indicelui de refracție al mediului mai refringent, față de mediul mai puțin refringent.**

¹ Un mediu este cu atât mai refringent, cu cât indicele de refracție este mai mare.

11.7. Reflexie totală. Se consideră o rază de lumină SA , ce trece dintr-un mediu mai refringent¹ (de exemplu, apă) într-un mediu mai puțin refringent (de exemplu, aer) (fig. 11.10, a); se constată următoarele:

— La un unghi de incidență $i' = 0$, corespunde un unghi de refracție $r' = 0$; raza normală SN trece în aer fără să fie deviată.

— Când unghiul de incidență i' crește, unghiul de refracție r' crește de asemenea, dar mai repede decât unghiul de incidență, și la o valoare, numită **unghi limită**, unghiul de refracție devine egal cu 90° .

Exemple:

1) Iată cum se calculează unghiul limită al apei ($n = 1,33$) față de aer ($n = 1$):

$$\sin l = \frac{1}{1,33} = 0,75; \quad l = 49^\circ.$$

2) În cazul unghiului limită al sticlei ($n = 1,5$) față de aer ($n = 1$):

$$\sin l = \frac{1}{1,5} = 0,66; \quad l = 42^\circ.$$

Reflexia totală se întâlnește în natură și în tehnică. Spre exemplu, în natură, călătorul care privește în deșert un palmier (fig. 11.10, b) îl vede inversat pe suprafața unui lac. Datorită încălzirii inegale a straturilor de aer de la suprafața pământului, densitatea lor este diferită ca și indicii de refracție care sînt din ce în ce mai mici, de sus în jos.

Raza de lumină care vine din A către sol traversează straturi din ce în ce mai puțin refringente; unghiul de incidență crescînd atinge valoarea limită și are loc reflexia totală. Observatorul vede imaginea palmierului ca și cum acesta s-ar reflecta pe suprafața unei ape liniștite; acest fenomen se numește miraj.

11.8. Lama cu fețele plan-paralele. Se numește **lamă cu fețele plan-paralele** un mediu transparent cuprins între două suprafețe plane și paralele, introdus într-un mediu, de asemenea, transparent.

O rază de lumină, care cade oblic pe o lamă cu fețele plan-paralele, iese din lamă paralel cu raza incidentă.

Această proprietate este o consecință a legii a doua a refracției.

Fie o rază de lumină SI (fig. 11.11), care cade pe fața L a unei lame plan-paralele; i unghiul de incidență. Raza refractată II' sosește pe fața M sub un unghi de incidență r' ; în I' , pe fața M are loc o a doua refracție și raza $I'R$, numită **rază emergentă**, iese în aer sub un unghi i' .

Se aplică, în I , legea a doua a refracției și se scrie:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r. \quad (6, a)$$

De asemenea, în I' :

$$n_2 \sin r' = n_1 \sin i'. \quad (6, b)$$

Unghiurile r și r' sînt egale ca alterne interne și dacă se compară relațiile (6, a) și (6, b) rezultă:

$$\sin i' = \sin i$$

de unde,

$$i' = i,$$

adică raza emergentă $I'R$ este paralelă cu raza incidentă SI .

Pentru un unghi de incidență dat, deplasarea d crește în același timp cu grosimea e și cu indicele de refracție al lamei.

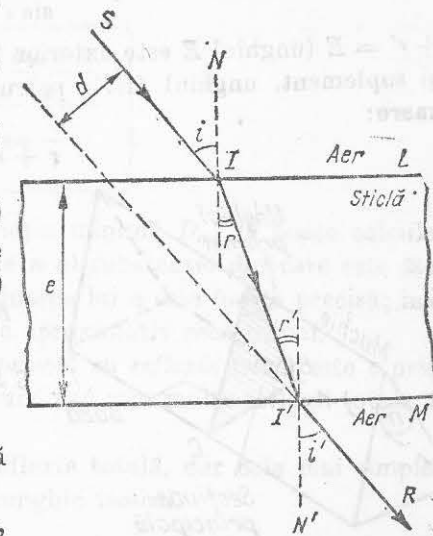


Fig. 11.11. Refracția printr-o lamă cu fețe plan-paralele.

Dacă se privesc diferite obiecte printr-o lamă cu fețele plan-paralele, ele apar numai deplasate. Dacă lama nu are fețele plan-paralele, obiectele privite par și deformate.

D. PRISMA OPTICĂ

11.9. Refracția printr-o prismă optică. O prismă optică este un mediu transparent (în general din sticlă) limitat de două fețe plane neparalele; intersecția lor constituie muchia prismei, iar unghiul diedru A format de aceste două fețe se numește *unghiul prismei*.

Orice secțiune a unei prismei printr-un plan perpendicular pe muchia ei se numește *secțiune principală* (fig. 11.12). Schematic, o prismă optică se reprezintă printr-o secțiune principală (fig. 11.13). Fața opusă muchiei considerate se numește *baza prismei* și nu joacă nici un rol în refracția luminii prin celelalte două fețe ale prismei.

Fie SI o rază de lumină monocromatică conținută în planul unei secțiuni principale a unei prismei (planul figurii 11.13), n indicele de refracție al substanței din care este făcută prisma, i și r unghiurile de incidență și de refracție pe prima față AB , r' și i' , unghiurile de pe fața a doua AC și D unghiul de deviație dintre raza incidentă SI și raza emergentă $I'R$.

La trecerea razei SI din mediul 1 (aer; $n_{\text{aer}} = 1$) în prismă, din legea a doua a refracției, aplicată în I , se scrie:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (1)$$

De asemenea, în I' :

$$\frac{\sin r'}{\sin i'} = \frac{1}{n}, \quad (2)$$

$r + r' = E$ (unghiul E este exterior în triunghiul EII'); $E = A$ (având același suplement, unghiul IEI' ; patrulaterul $AIEI'$ este inscriptibil) și prin urmare:

$$r + r' = A. \quad (3)$$

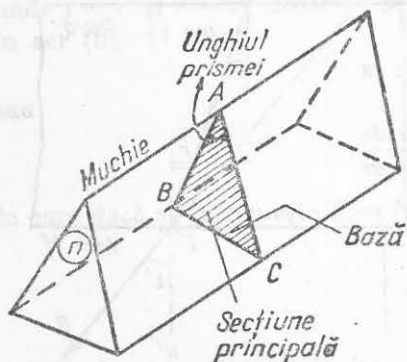


Fig. 11.12. Prismă optică.

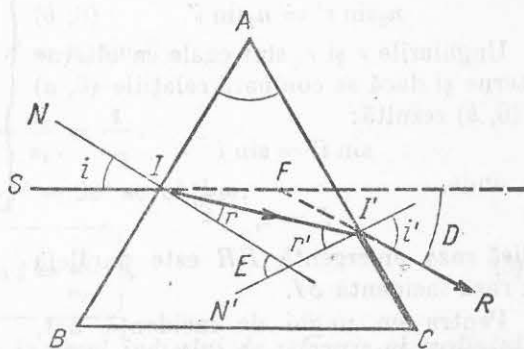


Fig. 11.13. Mersul unei raze de lumină într-o secțiune principală a unei prismei.

Din triunghiul IIF rezultă că suma unghiurilor FII' și FII' este egală cu unghiul exterior D ; deoarece $FII' = i - r$ și $FII' = i' - r'$, se poate scrie: $D = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r')$ sau, dacă se ține seama de (3), se obține:

$$D = i + i' - A. \quad (4)$$

Relațiile (1), (2), (3) și (4) se numesc *formulele prismei optice*. De obicei se cunosc A , n , i ; deci se poate deduce unghiul de deviație D .

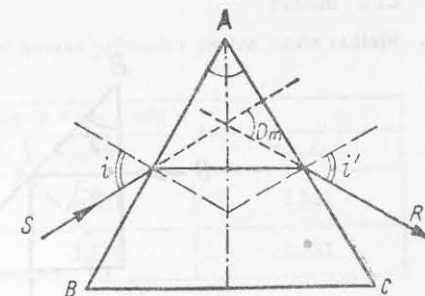


Fig. 11.14. Raza de lumină sub deviație minimă.

Deviația minimă: aplicație la determinarea indicelui de refracție al prismei. Se demonstrează¹ că deviația D are valoarea minimă D_m , când unghiul de emergență este egal cu unghiul de incidență:

$$i' = i \text{ (fig. 11.14),}$$

de unde rezultă și $r = r'$ sau, dacă se utilizează (3), $r = \frac{A}{2}$.

Din (4) se obține:

$$D_m = 2i - A; \quad i = \frac{D_m + A}{2}.$$

Se aplică legea a doua a refracției: $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ și se poate scrie:

$$\sin \frac{D_m + A}{2} = n \sin \frac{A}{2},$$

de unde:

$$n = \frac{\sin \frac{D_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \quad (5)$$

Dacă se măsoară unghiul A și deviația minimă D_m , se poate calcula cu ajutorul relației (5) indicele de refracție n al substanței din care este făcută prisma. Această metodă pentru determinarea lui n este foarte precisă; indicii de refracție se calculează cu o eroare de aproximativ zece miimi.

11.10. Prismă cu reflexie totală. O prismă cu reflexie totală este o prismă optică în care o rază de lumină suferă una sau mai multe reflexii totale, înainte de a ieși din prismă.

Se construiesc diferite prismă cu reflexie totală, dar cele mai simple au ca secțiune dreaptă un triunghi dreptunghic isoscel.

¹ Se derivează formulele prismei, în funcție de i , și se ține seama că deviația D are valoarea minimă D_m , pentru $\frac{dD}{di} = 0$, se obține condiția pentru D_m ; $i' = i$.

Indicii de refracție absoluți ai sticlei (din care se confecționează prismele) pentru unele radiații monocromatice.

Sticla	Indicii de refracție n		
	$n_{\text{roșu}}$	n_{galben}	n_{violet}
Crown*	1,504	1,507	1,521
Flint*	1,612	1,621	1,671

Experiența arată că o radiație monocromatică, traversind o prismă, este deviată, dar nu mai este descompusă.

E. LENTILE

11.12. Lentile și clasificarea lor. O lentilă este un mediu transparent (de obicei din sticlă) limitat de două calote sferice sau de o calotă sferică și un plan.

Lentilele sînt de două feluri:

1) *Lentile convergente* care sînt mai groase la mijloc decît la margini; un fascicul de raze paralele ce traversează o lentilă convergentă devine convergent.

2) *Lentile divergente* mai subțiri la mijloc decît la margini; un fascicul de raze paralele ce traversează o lentilă divergentă devine divergent.

Figura 11.16 reprezintă (în secțiune) diferite forme de lentile utilizate în tehnică.

La o lentilă se disting (fig. 11.17):

— *centrele de curbură* sînt centrele C_1 și C_2 ale celor două calote sferice; dacă lentila are o față plană, centrul său este la infinit;

— *razele de curbură* sînt razele R_1 , R_2 ale calotelor sferice;

— *axa principală* este dreapta ce unește cele două centre de curbură C_1 și C_2 sau, în cazul lentilelor care au o față plană, dreapta ce trece prin centrul unic C și este perpendiculară pe fața plană;

— *centrul optic* este punctul O situat pe axa optică, care are proprietatea că, orice rază de lumină care trece prin el nu este deviată; orice dreaptă ce trece prin centrul optic se numește *axă secundară*, spre exemplu OB .

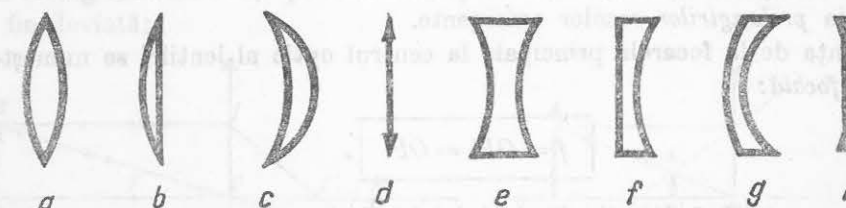


Fig. 11.16. Diferite tipuri de lentile și reprezentarea lor schematică: a) biconvexă; b) plan-convexă; c) menisc convergent; d) simbol pentru lentile convergente subțiri; e) biconcavă; f) plan concavă; g) menisc divergent; h) simbol pentru lentile divergente subțiri.

* Denumiri date unor categorii de sticlă preparate special.

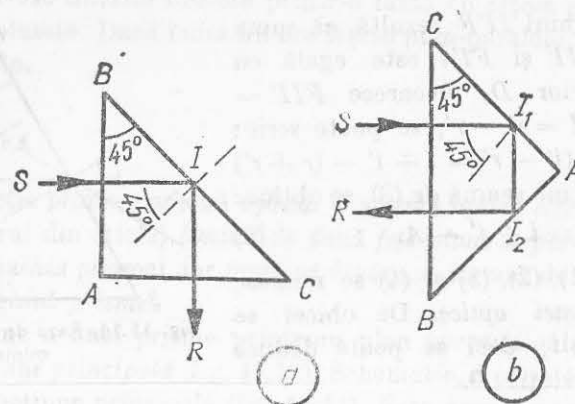


Fig. 11.15. Prismă cu reflexie totală.

Dacă pe fața AB (fig. 11.15, a) cade normal o rază de lumină SI , ea nu este deviată ($i = 90^\circ$) ajunge pe BC sub un unghi de 45° (superior unghiului limită, care la sticlă este de 42°) și se reflectă total după IR . Deci, fața BC a prismei se comportă ca o oglindă înclinată la 45° față de raza incidentă SI , care, în acest caz, este deviată cu 90° . Asemenea prismă cu reflexie totală se folosesc la periscop.

Dacă raza SI_1 cade pe ipotenuza BC (fig. 11.15, b), cele două reflexii totale, în I_1 și I_2 , întorc raza paralel cu ea însăși. Prismă cu reflexie totală funcționează, în acest caz, ca un sistem de două oglinzi plane perpendiculare. Astfel de prismă se folosesc, spre exemplu, la binoclul cu prismă.

11.11. Dispersia luminii. Fie un fascicul de lumină albă (lumina de la Soare sau de la un bec electric), care cade pe o prismă optică. El se va refracta succesiv: o dată cînd se propagă din aer în sticlă și a doua oară, din sticlă în aer.

Dacă fasciculul emergent cade pe un ecran, se observă o bandă luminoasă colorată diferit, de la roșu la violet. Prismă dă radiației violet o deviație maximă, iar radiației roșii o deviație minimă.

Se pot distinge, exceptînd nuanțele, 7 culori principale, în ordinea deviațiilor în creștere: roșu, portocaliu, galben, verde, albastru, indigo și violet (culorile curcubeului). Aceste radiații se numesc radiații simple sau radiații monocromatice.

Fenomenul de descompunere, prin refracție, a luminii albe în radiațiile monocromatice componente se numește *dispersia luminii*.

Experiența de mai înainte dovedește că, pentru același unghi de incidență a luminii albe, radiațiile simple ies din prismă sub unghiuri diferite, adică indicii de refracție al prismei este diferit pentru diferitele radiații monocromatice și, anume, el crește de la radiația roșie pînă la radiația violet (tabelul 11.2).

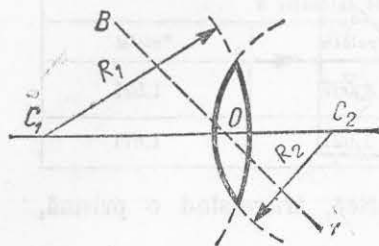


Fig. 11.17. Caracteristicile geometrice ale lentilelor.

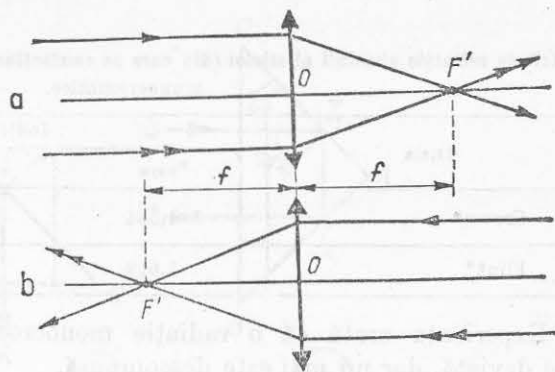


Fig. 11.18. Focar real

Studiul lentilelor se simplifică dacă se ține seama de anumite condiții numite *aproximațiile lui Gauss*; acestea sînt următoarele:

- 1) *lentilele sînt subțiri*, adică *grosimea lor*, măsurată pe axa principală, *este foarte mică* (neglijabilă) *în raport cu razele de curbura*;
- 2) *unghiul de deschidere al calotei sferice este mic* ($10-12^\circ$);
- 3) *unghiurile formate de razele luminoase cu axa principală sînt mici*, *razele sînt paraxiale*.

Lentilele subțiri se reprezintă schematic ca în figura 11.16, d, h.

11.13. Focare. Plane focale. Distanțe focale. Se poate arăta experimental că la un fascicul de raze paralele cu axa principală, ce cade pe o lentilă subțire convergentă, razele emergente converg într-un punct F' , situat pe aceeași axă, care se numește *focar principal* (fig. 11.18, a); deoarece lumina trece efectiv prin acest punct, se zice că acesta este un *focar real*.

Dacă razele incidente, cad, de asemenea, paralel cu axa principală, dar de cealaltă parte a lentilei, razele emergente converg într-un al doilea focar principal F , situat la aceeași distanță f de centrul optic O (fig. 11.18, b).

Deci *lentilele subțiri convergente au două focare principale reale F' și F , simetrice în raport cu centrul optic¹.*

De asemenea o *lentilă divergentă are două focare principale, simetrice în raport cu O* (fig. 11.19, a, b); aceste focare sînt *virtuale*, deoarece se găsesc la intersecția *prelungirilor* razelor emergente.

Distanța de la focarele principale la centrul optic al lentilei se numește *distanță focală*:

$$f = OF' = OF.$$

Dacă se modifică direcția fasciculului incident, cu condiția ca unghiul α dintre razele incidente și axa principală să fie mic, se pot obține o infinitate

¹ În acest caz lentila trebuie să se găsească în contact cu același mediu pe ambele fețe.

de focare, numite *focare secundare*, toate situate într-un plan perpendicular pe axa principală, numit *plan focal* (fig. 11.20).

11.14. Construcția geometrică a imaginilor. Studiul experimental al formării imaginii unui obiect luminos (spre exemplu o luminare aprinsă) printr-o lentilă convergentă se poate efectua cu dispozitivul reprezentat în figura 11.21.

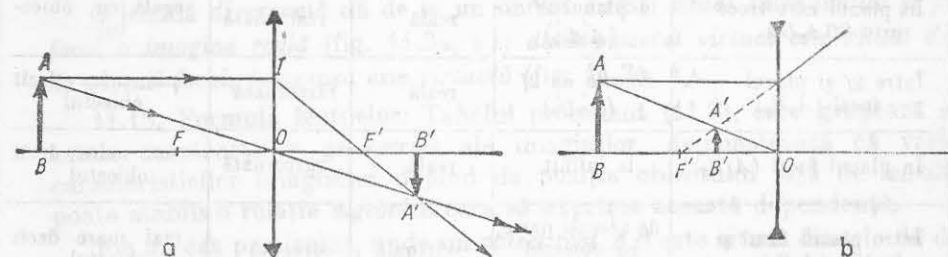
Dacă se depărtează sau se apropie ecranul de lentilă, la o anumită distanță se obține imaginea reală a flăcării (obiectului).

Fie o lentilă subțire convergentă, cu distanța focală cunoscută și AB un obiect liniar perpendicular pe axa principală, cu punctul B pe axă.

Se poate construi geometric imaginea obiectului AB , dacă se determină imaginea fiecărei extremități a obiectului, deci dacă se găsesc punctele A' și B' .

Pentru a se construi geometric imaginea unui punct, spre exemplu a punctului A (fig. 11.22, a), sînt suficiente două raze:

— raza AO care trece prin centrul optic O și deci traversează lentila fără să fie deviată;



11.22. Construcția imaginilor într-o lentilă: a) convergentă; b) divergentă.

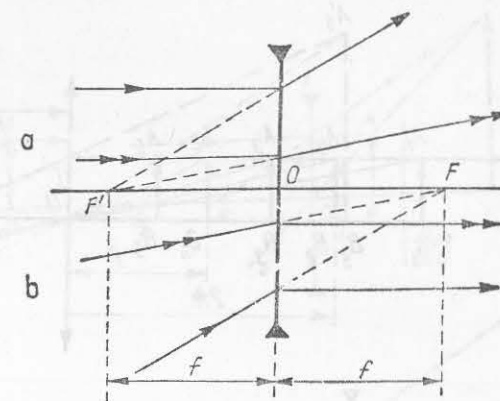


Fig. 11.19. Focar virtual.

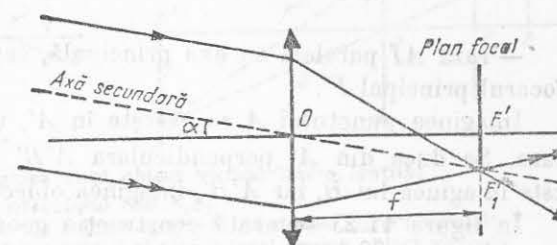


Fig. 11.20 Focar secundar, plan focal.

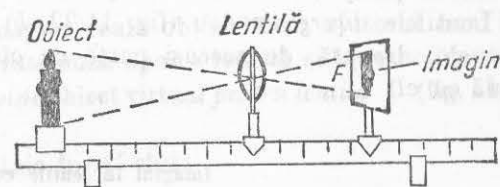


Fig. 11.21. Obținerea imaginii date de o lentilă convergentă.

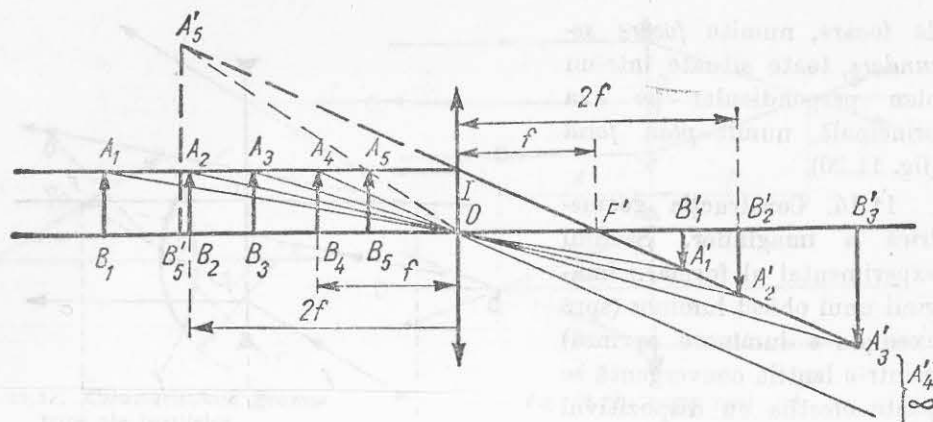


Fig. 11.23. Construcția geometrică a imaginilor date de o lentilă convergentă.

— raza AI paralelă cu axa principală, care se refractă în I și trece prin focarul principal F' .

Imaginea punctului A se găsește în A' , unde se intersectează cele două raze. Se duce din A' perpendiculara $A'B'$ pe axa principală; punctul B' este imaginea lui B , iar $A'B'$, imaginea obiectului AB .

În figura 11.23 se arată construcția geometrică a imaginilor date de o lentilă convergentă pentru diferite poziții ale obiectului, iar în tabelul 11.3 se indică: poziția, natura, sensul și mărimea acestor imagini.

Lentilele *divergente* dau (fig. 11.22, b) pentru un obiect real o imagine virtuală, dreaptă, de aceeași parte cu obiectul și mai mică sau cel mult egală cu el.

Tabelul 11.3

Imagini în lentile convergente

Obiectul	Imaginea			
	poziția	natura	sensul	mărimea
La infinit	în planul focal	reală	răsturnată	foarte mică
Dincolo de dublul distanței focale $2f(A_1B_1)$	între planul focal și $2f(A_1B_1)$	reală	răsturnată	mai mică decât obiectul
În planul care trece prin $2f(A_2B_2)$	în planul $2f(A_2B_2)$	reală	răsturnată	egală cu obiectul
Între $2f$ și planul focal (A_3B_3)	dincolo de $2f(A_3B_3)$	reală	răsturnată	mai mare decât obiectul
În planul focal (A_4B_4)	la infinit	reală	răsturnată	mai mare decât obiectul
Între planul focal și lentilă (A_5B_5)	de aceeași parte cu obiectul (A_5B_5)	virtuală	dreaptă	mai mare decât obiectul

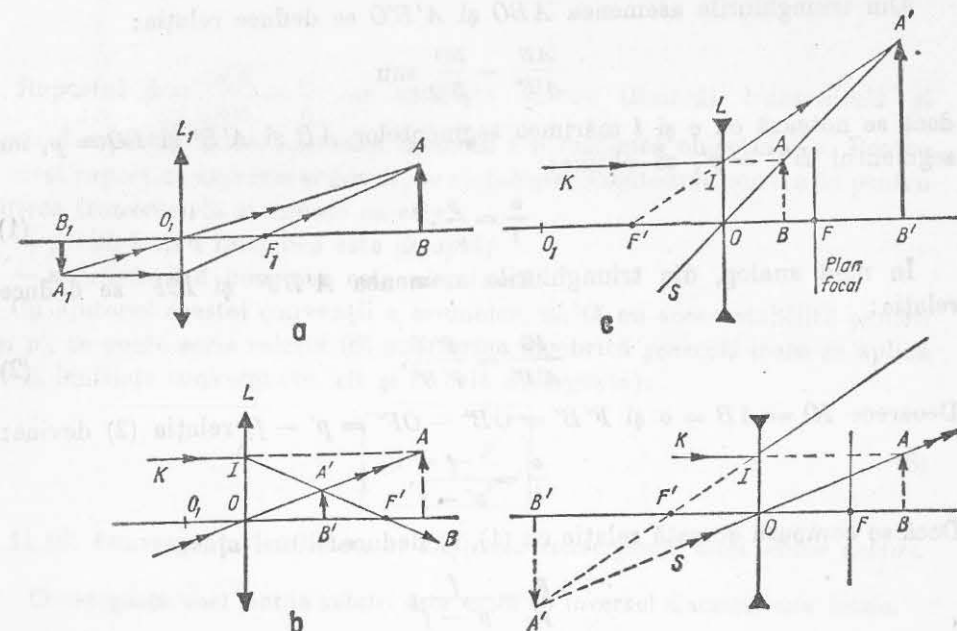


Fig. 11.24. Imaginea unui obiect virtual într-o lentilă:

- Imaginea reală AB a obiectului real A_1B_1 ;
- Interpunerea unei lentile L între L_1 și AB . AB devine obiect virtual;
- Imaginea AB plasată între lentilă și planul focal devine obiect virtual;
- Imaginea AB situată dincolo de planul focal devine obiect virtual.

Obiect virtual. Fie AB o imagine reală obținută cu ajutorul unei lentile auxiliare L_1 (fig. 11.24, a). Se interpune apoi o lentilă subțire convergentă L între L_1 și AB ; imaginea AB devine obiect virtual pentru lentila L (fig. 11.24, b), A_1B_1 fiind obiectul real.

Printre razele care se întretaie în A' sînt:

— raza SO care nu este deviată;
— raza KI , paralelă cu axa principală, care se refractă trecînd prin focarul principal F' al lentilei L ; ea întîlnește raza precedentă în punctul A' , care constituie imaginea reală a punctului A . $A'B'$ este imaginea reală a obiectului virtual AB .

Se constată că o lentilă convergentă dă, de la un obiect *virtual*, o *imagine reală*, situată între lentilă și planul focal, dreaptă și mai mică decât obiectul.

O lentilă *divergentă* dă de la un obiect *virtual* situat între lentilă și planul focal o *imagine reală* (fig. 11.24, c); dacă obiectul *virtual* este situat dincolo de planul focal, imaginea este *virtuală* (fig. 11.24, d).

11.15. Formula lentilelor. Tabelul precedent (11.3), care grupează rezultatele construcțiilor *geometrice* ale imaginilor, demonstrează că variațiile caracteristicilor imaginilor depind de poziția obiectului față de lentilă. Se poate stabili o relație *algebrică* care să exprime această dependență.

Fie un caz particular, unde un obiect *real* AB este situat dincolo de dublul distanței focale (fig. 11.22); imaginea $A'B'$ este în acest caz *reală* și *răsturnată*.

Din triunghiurile asemenea ABO și $A'B'O$ se deduce relația:

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{BO}{B'O} \text{ sau}$$

dacă se notează cu o și i mărimea segmentelor AB și $A'B'$ și $BO = p$, iar segmentul $B'O = p'$, se obține:

$$\frac{o}{i} = \frac{p}{p'}. \quad (1)$$

În mod analog, din triunghiurile asemenea $A'B'F'$ și IOF' se deduce relația:

$$\frac{IO}{A'B'} = \frac{F'O}{F'B'}. \quad (2)$$

Deoarece $IO = AB = o$ și $F'B' = OB' - OF' = p' - f$, relația (2) devine:

$$\frac{o}{i} = \frac{f}{p' - f}.$$

Dacă se compară această relație cu (1), se deduce:

$$\frac{p}{p'} = \frac{f}{p' - f};$$

această relație se aduce la același numitor și se împarte cu $pp'f$, se obține relația:

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}} \quad (3)$$

care se numește *formula lentilelor*, în care se ia convențional

p $\begin{cases} \text{pozitiv dacă obiectul este real} \\ \text{negativ dacă obiectul este virtual} \end{cases}$

p' $\begin{cases} \text{pozitiv dacă imaginea este reală} \\ \text{negativ dacă imaginea este virtuală} \end{cases}$

f $\begin{cases} \text{pozitiv dacă focarul este real (lentile convergente)} \\ \text{negativ dacă focarul este virtual (lentile divergente)}. \end{cases}$

Dacă se ține seamă de aceste convenții, formula lentilelor (3) se aplică atât la lentilele convergente, cât și la cele divergente.

Observație. Dacă se notează $p = x + f$ și $p' = x' + f$ în care $x = BF$ și $x' = B'F'$ (fig. 11.22), formula lentilelor devine:

$$\boxed{xx' = f^2} \quad (4)$$

formulă cu care este mult mai ușor de lucrat decât cu (3).

Mărimea transversală. Triunghiurile asemenea OAB și $OA'B'$ dau (fig. 11.22):

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB}. \quad (5)$$

Raportul $\beta = \frac{A'B'}{AB} = \frac{i}{o}$ se numește *mărime (liniară) transversală* și exprimă raportul dintre mărimea imaginii i și mărimea obiectului o . Pentru ca acest raport să exprime și *sensul*, se stabilește următoarea convenție pentru mărimea transversală și anume ea este:

- pozitivă când imaginea este dreaptă;
- negativă când imaginea este răsturnată.

Cu ajutorul acestei convenții a semnelor, unită cu aceea stabilită pentru p și p' , se poate scrie relația (6) sub forma algebrică *generală* (care se aplică atât la lentilele convergente, cât și la cele divergente):

$$\boxed{\beta = -\frac{p'}{p}} \quad (6)$$

11.16. Convergența lentilelor. a) Definiția convergenței unei lentile subțiri.

Convergența unei lentile subțiri este egală cu inversul distanței sale focale.

Unitatea de convergență se numește *dioptrie* și este convergența unei lentile cu distanța focală de 1 metru. Se obține convergența exprimată în dioptrii, când se măsoară distanța focală în metri:

$$\boxed{C_{(\text{dioptrii})} = \frac{1}{f_{(\text{metri})}}} \quad (7)$$

În această relație se consideră distanța focală f pozitivă dacă lentila este convergentă și negativă dacă este divergentă, de unde rezultă evident că:

- lentilele *convergente* au o convergență *pozitivă*;
- lentilele *divergente* au o convergență *negativă*.

b) *Formula convergenței unei lentile subțiri.* Convergența unei lentile depinde pe de o parte de *forma* (convexă sau concavă) și de *razele de curbură* R și R' ale fețelor sale, pe de alta de n *indicele de refracție* relativ al substanței din care este făcută lentila, față de mediul ambiant $n = \frac{n_L}{n_A}$.

Se demonstrează că se poate exprima convergența unei lentile prin formula:

$$\boxed{C = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)} \quad \left. \begin{matrix} R \\ R' \\ f \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{în metri} \\ \text{în dioptrii} \end{matrix} \quad (8)$$

în care R și R' sînt:

- *pozitive*, dacă fața este *convexă*;
- *negative*, dacă fața este *concavă*.

Ținînd seamă de această convenție a semnelor, formula (8) se aplică atât la lentilele convergente cât și la cele divergente.

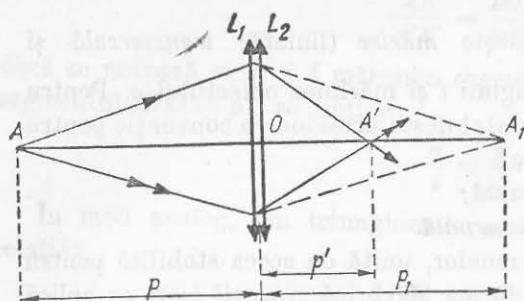


Fig. 11.25. Pentru calculul convergenței unui sistem de două lentile subțiri alăturate.

Fie un caz simplu de două lentile convergente suficient de subțiri pentru ca, alăturate, *centrelor lor optice să fie practic confundate în O* (fig. 11.25). Se consideră un punct obiect *A* pe axa principală comună celor două lentile. Lentila L_1 , de distanță focală f_1 , dă o imagine reală A_1 , astfel că:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f_1}. \quad (9, a)$$

Pentru lentila L_2 , de distanță focală f_2 , acest punct A_1 este un obiect *virtual* de la care ea dă o imagine A' ; dacă se consideră *negativ* segmentul OA_1 (deoarece A_1 este virtual), se obține:

$$\frac{1}{-p_1} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_2}. \quad (9, b)$$

Se adună (9, a) cu (9, b) membru cu membru, rezultă:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

sau dacă se notează:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (10)$$

se regăsește formula lentilelor pentru o singură lentilă cu distanță focală F :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{F}.$$

Astfel, sistemul de lentile alăturate este echivalent cu o lentilă unică de distanță focală F .

Dacă convergența lentilei L_1 este $C_1 = \frac{1}{f_1}$ și a lentilei L_2 , $C_2 = \frac{1}{f_2}$, convergența C a lentilei echivalente sistemului, se scrie ținând seamă de (10):

$$C = C_1 + C_2 \quad (11)$$

Se pot alătura două lentile subțiri oarecare, convergente sau divergente, se găsește aceeași relație (11) între valorile *algebrice* ale convergențelor.

Dacă o lentilă are o *față plană*, se poate considera această față ca o parte dintr-o sferă de rază R' infinită, deci $\lim_{R' \rightarrow \infty} \frac{1}{R'} = 0$ de unde înlocuind în (8) se obține:

$$C = \frac{1}{f} = \frac{n-1}{R}.$$

c) *Convergența unui sistem de lentile subțiri alăturate.* Două sau mai multe lentile subțiri alăturate, ale căror axe principale coincid, formează un *sistem optic*.

● Un sistem de lentile subțiri alăturate este echivalent cu o lentilă subțire unică de același centru optic și de convergență egală cu suma algebrică a convergențelor lentilelor alăturate.

ÎNTREBĂRI, EXERCIIII, PROBLEME

1. Să se calculeze în cât timp ajunge lumina de la Lună la Pământ, dacă distanța dintre Pământ și Lună este de 60 de ori raza Pământului, $R = 6\,370\text{ km}$

Răspuns: $t = 1,27\text{ s}$.

2. Distanțele astronomice se exprimă în ani-lumină (1 an-lumină este distanța parcursă de lumină în vid, în timp de 1 an: 365,25 zile); să se exprime 1 an-lumină în km.

Răspuns: 1 an-lumină = $9,47 \cdot 10^{10}\text{ km}$.

3. În experiența lui Michelson, pentru determinarea vitezei luminii, distanța dintre oglinda rotitoare P și oglinda O_1 este de 35,4 km (fig. 11.4). Cunoscând viteza luminii $c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$, să se calculeze turația n pe care trebuie să o aibă oglinda P pentru ca observatorul să vadă lumină.

Răspuns: $n = 530\text{ rot/s}$.

4. O prismă de sticlă, care are indicele de refracție n , are pentru o secțiune dreaptă ABC , unghiurile $A = 90^\circ$ și $B = 75^\circ$.

În acest plan al secțiunii drepte, o rază de lumină SI cade pe fața AB sub un unghi de incidență i .

- a) Să se găsească relația dintre i și n pentru ca raza refractată II' să facă cu fața BC un unghi de 45° .

- b) Care este condiția ca raza II' să sufere în I' pe fața BC , o reflexie totală?

Răspuns: a) $\sin i = n/2$; b) $n > \sqrt{2}$.

5. Să se calculeze convergența unei lentile menisc divergent din sticlă care are indicele de refracție $n = 1,5$ și ale cărei raze de curbură sînt de 25 și 50 cm.

Răspuns: $C = -1\text{ dioptrie}$.

6. O lentilă convergentă, așezată la 20 cm de un obiect AB , dă o imagine virtuală de 3 ori mai mare decît obiectul; care este distanța focală a lentilei?

Răspuns: $f = 0,3\text{ m}$.

7. Cu o lentilă convergentă L , avînd distanța focală de 40 cm, se proiectează pe un ecran o imagine reală și răsturnată a unui obiect AB perpendicular pe axa principală.

- a) La ce distanță de obiect trebuie să fie așezată lentila pentru ca imaginea să apară pe ecran de 4 ori mai mare ca obiectul?

- b) Care va fi distanța lentilei la ecran?

- c) Se așază între ecran și L la 1 metru de ecran o lentilă divergentă L' avînd aceeași axă ca L . Imaginea $A'B'$ dispăre; depărtînd ecranul de lentila L' apare o imagine $A''B''$; ea este de două ori mai mare decît $A'B'$, adică de 8 ori mai mare decît obiectul AB . Care este sensul imaginii $A''B''$ în raport cu obiectul AB ? Care este distanța focală a lentilei divergente?

- d) Care este distanța în noua poziție de la ecran la lentila L ?

Răspuns: a) $p = 0,5\text{ m}$; b) $p' = 2\text{ m}$; c) $f = -2\text{ m}$; d) 3 m .

8. O lentilă biconvexă din sticlă cu indicele de refracție $n = 1,5$ are fețe cu aceeași rază de curbură $R = 12\text{ cm}$. Lentila se așază între un obiect luminos și un paravan. Distanța dintre obiect și paravan este $d = 60\text{ cm}$. Să se determine: a) pozițiile lentilei, în care se formează imagini reale și clare pe paravan; b) raportul dintre mărimea imaginii și a obiectului, corespunzător pozițiilor de la punctul a).

(Univ. Timișoara, fac. fizică, iulie 1971.)

c) *Franjele întunecoase* corespund punctelor pentru care d este un număr impar de semilungimi de undă:

$$\frac{ax}{D} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

de unde

$$x = (2k + 1) \frac{\lambda D}{2a}. \quad (3)$$

d) *Interfranja*. Relațiile (2) și (3) arată că distanța dintre două franje luminoase sau întunecoase consecutive este aceeași; ea se numește *interfranjă* și se află dacă se calculează variația lui x când k variază cu o unitate.

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{D}{a} (k + 1) \lambda - \frac{D}{a} k \lambda,$$

adică:

$$i = \frac{\lambda D}{a} \quad (4)$$

e) *Determinarea lungimii de undă*. Relația (4) se poate scrie:

$$\lambda = \frac{ai}{D} \quad (5)$$

Măsurarea lui a și D este destul de ușoară. Pentru a se obține interfranja i , se așază în planul de observare a franjelor un micrometru (cu o gradație pe sticlă) și se observă cu ajutorul unei lupe; se înlocuiesc datele găsite în relația (5) și se determină astfel lungimea de undă a radiației monocromatice.

12.4. *Interferența în lumina albă*. Dacă se repetă experiența cu dispozitivul Young și se folosește o sursă de lumină albă în locul sursei monocromatice, fără să se schimbe celelalte condiții, se observă pe ecran:

— o *franjă centrală albă însoțită de o parte și de alta de câteva franje irizate* (colorate începând cu violet și terminând cu roșu),

— apoi o *tentă albă uniformă*, numită *alb de ordin superior*.

Pentru a se explica acest aspect al cîmpului de interferență în lumină albă, este suficient să admitem că radiațiile de lungimi de undă diferite nu interferă între ele; fiecare radiație monocromatică dă propriul său sistem de franje, independent de celelalte radiații. Interfranjele sînt diferite pentru fiecare sistem, deoarece ele sînt proporționale cu lungimea de undă (4).

Franja centrală este albă deoarece acolo coincid toate franjele luminoase, diferența de drum este nulă pentru toate radiațiile. De o parte și de alta a franjei centrale, franjele luminoase ale fiecărei radiații nu mai coincid; rezultă franje irizate. Prin suprapunerea radiațiilor luminii albe (cu excepția radiațiilor care, într-un punct dat, dau o franjă întunecoasă) se dă impresia mai departe a unei nuanțe albe uniforme, nu se mai văd franje ci albul de ordin superior.

12.5. *Deplasarea franjelor*. În studiul interferenței luminii, în paragrafele precedente, s-a considerat că undele interferente se propagă în același mediu omogen. Sînt însă cazuri cînd astfel de unde se propagă în medii diferite, cu indici de refracție diferiți, ca de exemplu în *experiența următoare*:

Se consideră în fața fantei S_1 a dispozitivului Young o lamă de grosime mică d și de indice de refracție n (fig. 12.4).

Pe ecranul E , prin introducerea lamei se observă o translație a franjelor de interferență; în lumina albă, se vede *franja centrală albă deplasată către fanta care este acoperită de lamă*.

Această deplasare se *explică* astfel: În locul porțiunii de *drum geometric*, raza de lumină pornită din S_1 străbate acum un *drum optic* $(d) = nd$; deci lama de mică introduce un drum suplimentar: $nd - d = (n - 1)d$.

- Se numește *drum optic* (d) corespunzător unui drum geometric d , produsul dintre drumul geometric parcurs de o rază de lumină într-un mediu și indicele de refracție n al aceluia mediu.

Deci raza de lumină pînă ajunge la ecranul E străbate un drum mai lung: $S_1A_1 + (n - 1)d$. Ca raza pornită din S_1 să producă o bandă centrală, trebuie să întâlnească pe ecranul E o rază pornită din S_2 , care străbate un drum mai mare decît $S_2A_1 = S_1A_1$; o astfel de rază este S_2A , în care caz banda centrală s-a deplasat din A_1 în A , de partea lui S_1 și cu ea se deplasează întregul sistem de franje.

12.6. *Interferența prin lame subțiri*. Fie o lamă cu fețele L și M paralele (fig. 12.5), care are o grosime de zecimi de micron. O rază de lumină SA se refractă, pătrunzînd în lamă după raza AB ; în M numai o parte din lumină se reflectă, restul ieșind din lamă ca rază emergentă CE . O a doua rază pornită din S , ajunge în C , reflectîndu-se după CF . Cele două raze interferă în punctul C ; se produce fenomenul de interferență, obținîndu-se franjele caracteristice. Franjele pot fi văzute cu ochiul acomodat pentru suprafața lamei; deci franjele de interferență sînt *localizate* pe lamă.

Diferența de drum optic (d) dintre cele două raze de lumină 1 și 2 este:

$$\Delta(d) = (d_2) - (d_1) = n(AB + BC) - n' \left(DC + \frac{\lambda}{2} \right)$$

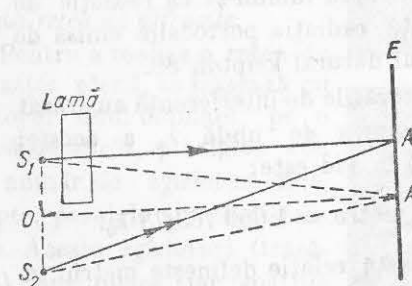


Fig. 12.4. Deplasarea franjelor.

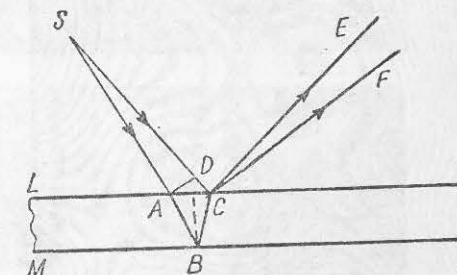


Fig. 12.5. Interferența luminii prin lame subțiri.

unde n este indicele de refracție al lamei, iar n' indicele de refracție al aerului. (S-a adăugat $\frac{\lambda}{2}$ la raza DC deoarece în C raza 2 reflectându-se pe suprafața sticlei se produce o reflexie cu pierdere de $\frac{\lambda}{2}$ sau cu un defazaj de π . Reflexia razei 1 în B nu introduce nici o diferență de fază.)

Temă: Explicați de ce reflexia razei 1 în B nu se face cu câștig de $\frac{\lambda}{2}$.

Dacă diferența de drum optic este un număr par de $\frac{\lambda}{2}$, adică $\Delta(d) = 2k \frac{\lambda}{2}$ în C se obține un maximum de interferență, iar dacă diferența de drum optic este un număr impar de $\frac{\lambda}{2}$, adică $\Delta(d) = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ se va obține un minim de interferență.

Dacă lumina incidentă este monocromatică se obțin franje luminoase și întunecoase, iar dacă lumina este albă atunci franjele sînt colorate, pentru că într-o direcție dată interferă numai radiațiile de o lungime de undă determinată.

Se obțin franje de interferență frumos colorate, cu o lamă subțire din bule de săpun, sau dintr-un lichid uleios stratificat pe suprafața unei ape liniștite (fig. 12.6). Puteți explica aspectul lor?

12.7. Aplicații ale interferenței. Fenomenele de interferență luminii sînt de o mare sensibilitate, din cauza lungimii de undă foarte mici a radiațiilor de lumină. O variație de $\frac{\lambda}{2}$ a diferenței de drum schimbă total aspectul cîmpului de interferență. Din această cauză se face apel la fenomenele de interferență luminii de cîte ori dorim să punem în evidență mici deplasări sau grosimi foarte mici. Cîtăm cîteva aplicații:

- la măsurarea coeficientului de dilatație a cristalelor;
- la măsurarea indicelui de refracție a gazelor;
- la controlul paralelismelor eșitelor unei balanțe;
- la compararea a două etaloane de lungimi de undă foarte apropiate.

Măsurările bazate pe fenomenul de interferență sînt foarte precise. Astfel, se poate compara lungimea de undă a unei radiații monocromatice cu metrul, spre exemplu luîndu-se ca radiație de referință, radiația portocalie emisă de izotopul natural kripton 86.

Măsurările de interferență au arătat că lungimea de undă λ_0 a acestei radiații în vid este:

$$1 \text{ metru} = 1\,650\,763,73 \lambda_0.$$

Această relație definește metrul în Sistemul Internațional (SI) (STAS 737-68).

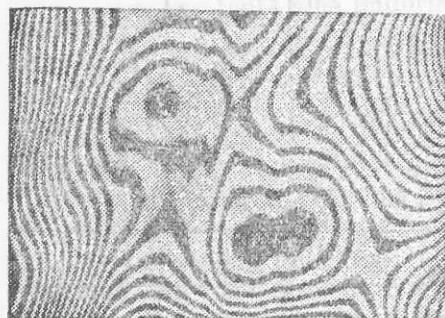


Fig. 12.6. Franje obținute prin interferența luminii prin lame subțiri.

Cu alte cuvinte se poate spune prin definiție:

- Metrul are o lungime egală cu 1 650 763,73 lungimi de undă în vid a radiației portocalii emisă de izotopul kripton 86.

În fine, interferența luminii constituie o dovadă experimentală a caracterului ondulatoriu al luminii.

B. DIFRACTIA LUMINII

12.8. Difracția luminii. De la studiul undelor elastice se cunoaște că *difracția* este fenomenul de ocolire aparentă a obstacolelor de către unde. Acest fenomen se produce dacă obstacolele întîlnite de unde sînt de același ordin de mărime cu lungimea de undă, ori mai mici. Difracția se explică cu *principiul lui Huygens*.

În cazul luminii, deoarece lungimea de undă este foarte mică (de ordinul a zecimii de micron) fenomenul de difracție nu este ușor de observat. Pentru a arăta fenomenul de *difracție a luminii* se face următoarea experiență:

Se iluminează o fantă reglabilă cu ajutorul unei surse de lumină. Dacă inițial deschiderea este suficient de mare, se observă pe un ecran o pată luminoasă produsă de razele care trec prin deschidere și care se propagă rectiliniu (fig. 12.7, *a*).

Se micșorează deschiderea în așa fel încît să devină comparabilă cu lungimea de undă a luminii, se observă pe ecran *franje de difracție* formate dintr-o bandă luminoasă prezentînd alternanțe de intensitate (fig. 12.7, *b* și *c*).

Fenomenul de difracție dovedește caracterul ondulatoriu al luminii.

12.9. Rețeaua de difracție. În experiența precedentă s-a arătat difracția luminii printr-o fantă în raze paralele. Fie acum cazul unui șir de fante, paralele între ele, care se numește *rețea de difracție*.

Pentru a realiza o rețea de difracție plană, se trasează cu ajutorul unui diamant, pe o placă de sticlă, plexiglas etc. un număr de zgîrieturi fine, drepte, paralele și echidistante. Aceste zgîrieturi (trăsături) sînt opace, iar spațiile dintre ele sînt transparente jucînd rolul fantelor.

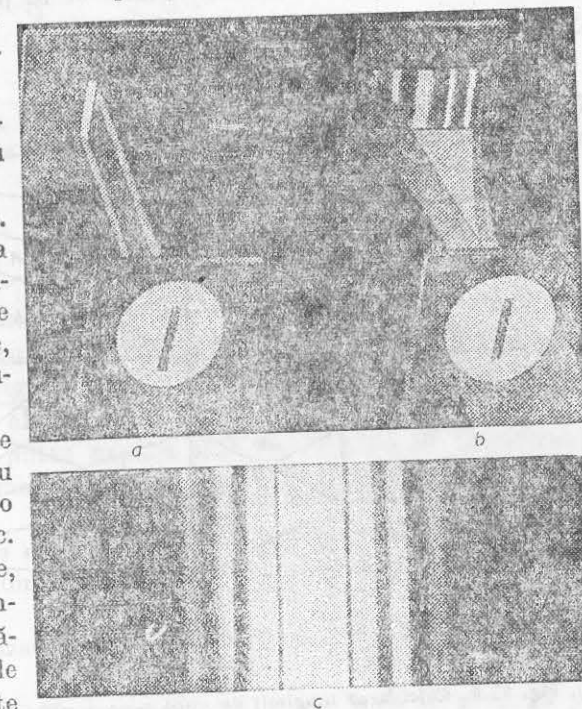


Fig. 12.7. Franje de difracție.

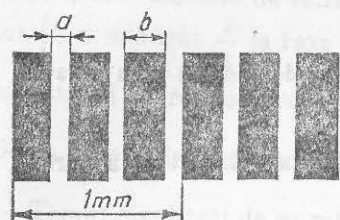


Fig. 12.8. Constanta rețelei de difracție.

Dacă se notează cu a lățimea unei fante și cu b lățimea regiunii opace, suma $d = a + b$ se numește *constantă rețelei de difracție* (fig. 12.8). Dacă N este numărul de fante, sau numărul de zgirieturi pe milimetru de lungime, între constanta rețelei d și N există relația:

$$N(a + b) = 1 \text{ mm}$$

sau

$$Nd = 1 \text{ mm.}$$

Până azi s-au construit rețele de difracție cu până la 2 000 de zgirieturi pe milimetru.

Cu ajutorul rețelei de difracție se poate determina lungimea de undă a radiației cu care lucrăm.

Experiență. Se trimite perpendicular pe o rețea de difracție R un fascicul monocromatic de radiații paralele și cu lentila L se proiectează aceste radiații, după trecerea lor prin rețea, pe ecranul E aflat în planul ei focal P_f (fig. 12.9). În acest caz pe ecranul E se obține un maximum luminos central, însoțit de o parte și de alta de maxime laterale (secundare separate prin regiuni întunecoase).

Radiațiile care ajung în dreptul fantelor rețelei, se difractă; punctele de pe fante, spre exemplu punctele $A, B, C, \dots$, conform *principiului lui Huygens*, devin centre de unde elementare ce se propagă în toate direcțiile. Se

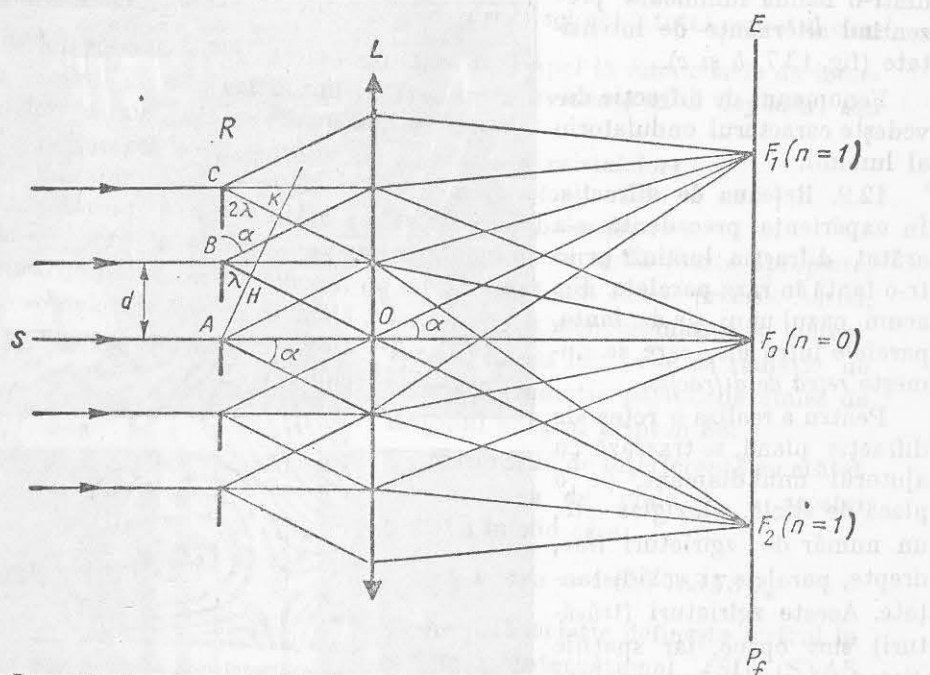


Fig. 12.9. Calcularea lungimii de undă a unei radiații monocromatice cu ajutorul rețelei de difracție.

consideră din acestea fasciculul de radiații paralele care face un unghi α cu normala SO la rețea. Undele ce pleacă din A și B vor avea între ele o diferență de drum BH , iar din triunghiul dreptunghic ABH rezultă:

$$BH = AB \sin \alpha$$

sau $BH = d \sin \alpha$, unde $d = a + b$ este constanta rețelei.

Pe ecran se obțin maxime de luminozitate în punctele pentru care diferența de drum BH este un număr întreg n de lungimi de undă adică:

$$BH = n\lambda.$$

Deci se poate scrie:

$$d \sin \alpha = n\lambda, \quad (1)$$

unde n este numărul de ordine al maximumului, pornind de la maximumul central $n = 0$. Dacă în formula (1) se pune $n = 0$ se obține $\alpha = 0$, ceea ce înseamnă că maximumul central de ordinul zero este format de radiațiile perpendiculare pe rețea, dacă se pune $n = 1$ se obține α_1 , adică înclinarea radiațiilor care formează maximele de ordinul I, situate de o parte și de alta a maximumului central ș.a.m.d.

În figura 12.9 se observă că raportul:

$$\frac{F_1F_0}{F_0O} = \tan \alpha \approx \sin \alpha$$

unde înlocuind $F_1F_0 = i$ și $F_0O = f$ în (1), se obține:

$$\lambda = \frac{di}{nf}. \quad (2)$$

Dacă se măsoară pe ecran F_1F_0 și pe bancul optic distanța dintre lentilă și ecran și se cunoaște constanta rețelei, cu formula (2) se poate calcula lungimea de undă a radiației.

C. CONCLUZII CU PRIVIRE LA NATURA LUMINII

12.10. Natura luminii. Dintre teoriile mai vechi cu privire la natura luminii, amintim aici *teoria corpusculară* emisă de *Newton*. Prin această teorie s-a căutat să se explice propagarea rectilinie a luminii, legile reflexiei, în mod analog cu reflexia unui corp elastic de un perete elastic.

Teoria corpusculară nu putea explica însă fenomenele de interferență, difracție, polarizare a luminii, explicând satisfăcător numai fenomenul de reflexie.

În anul 1678, *Huygens* a emis *teoria ondulatorie* și a înlăturat astfel dificultățile din explicarea fenomenelor de interferență și difracție prin teoria corpusculară.

Teoria ondulatorie se bazează pe următoarele concluzii sugerate de experiență:

— Lumina este o consecință a mișcării vibratorii, care se propagă prin unde.

— O radiație monocromatică se datorește unei mișcări sinusoidale de perioadă T determinată, caracteristică radiației și independentă de mediul transparent.

— Undele luminoase sînt transversale, adică normale pe direcția de propagare.

Teoria ondulatorie a luminii este însă compatibilă cu principiul de propagare rectilinie a luminii și cu legile lui Snell-Descartes; prin urmare ea permite să se regăsească legile reflexiei și refracției.

Fizicianul *Maxwell*, în 1865, a considerat că lumina se datorește vibrațiilor unui câmp electric asociat cu un câmp de inducție magnetică perpendiculară, iar ansamblul acestor două câmpuri constituie câmpul electromagnetic; după *Maxwell*, lumina este formată din unde electromagnetice.

ÎNTREBĂRI, EXERCITII, PROBLEME

1. Într-un dispozitiv Young, cele două fante S_1 și S_2 sînt la distanța de 1,00 mm. Pe un ecran paralel la S_1S_2 și la distanța $D = 200$ cm de acesta, se observă franjele obținute. Se folosește o radiație monocromatică a cărei lungime de undă în aer este $\lambda = 0,500 \mu\text{m}$. Să se calculeze distanța x care separă a cincea franjă întunecoasă de planul de simetrie al dispozitivului.

Răspuns: $x = 4,5$ mm.

2. O radiație monocromatică emisă de fanta S_0 cade pe o placă P situată la 1 m de fantă. Placa P este prevăzută cu alte două fante S_1 și S_2 care au o distanță între ele de 1 mm. Pe un ecran E situat la o distanță de 1,2 m de planul ce trece prin S_1S_2 , se observă franjele. Să se găsească lungimea de undă a radiației, dacă se cunoaște că interfranja $i = 0,6$ mm.

Răspuns: $\lambda = 0,5$ mm.

3. O radiație monocromatică, emisă de o sursă S , cade pe o fantă subțire S_0 , apoi pe o placă P prevăzută cu două fante fine S_1 și S_2 , care sînt verticale și așezate la aceeași înălțime. Între fantele S_1 și S_2 , este o distanță de 2 mm. Se observă franjele de interferență pe un ecran E . Se va lua ca plan al figurii planul perpendicular pe fante. Această figură admite ca axă de simetrie dreapta S_0A , A fiind mijlocul distanței S_1S_2 . Se găsește distanța dintre două franje luminoase consecutive egală cu 0,34 mm. Se deplasează ecranul E cu o distanță egală cu 0,5 m. În noua sa poziție E' , ecranul rămîne perpendicular pe S_0A . Distanța dintre două franje luminoase consecutive este atunci 0,51 mm.

Să se calculeze lungimea de undă a radiației folosite.

Răspuns: $\lambda = 6800 \text{ \AA}$.

4. Un izvor de lumină monocromatică luminează două fante înguste efectuate într-un paravan P . Distanța dintre fante este de 1 mm, iar între izvorul de lumină și paravanul P este plasat un alt paravan, cu o fantă ce se găsește pe mediatoarea dintre cele două fante. Pe un al treilea paravan P' , aflat la 1 m depărtare de P și paralel cu el, se formează un sistem de franje de interferență.

a) Interferența fiind de 0,6 mm, să se determine lungimea de undă a radiației monocromatice folosite în aer.

b) Cum se modifică interfranja, dacă spațiul dintre paravane se umple cu apă? Se știe că viteza luminii în apă este $3/4$ din viteza luminii în aer.

c) Cum se va observa fenomenul de interferență dacă fantele sînt luminate cu lumină albă? Care va fi lățimea spectrului, cînd între paravane se află aer, știind că lumina vizibilă are lungimea de undă cuprinsă între $0,75 \mu\text{m}$ (roșu) și $0,4 \mu\text{m}$ (violet)?

(Olimpiadă, 1960)

Răspuns: a) $\lambda = 6000 \text{ \AA}$; b) $i' = 0,45$ mm;

c) $x_0 = 0,4$ mm; $x_T = 0,75$ mm și $\Delta x = 0,35$ mm.

13. OPTICĂ FOTONICĂ

A. EFECTUL FOTOELECTRIC

13.1. Emisia fotoelectrică. Câmpul electromagnetic al undelor luminoase interacționează cu particulele încărcate electric din care este alcătuită substanța. Într-un metal, electronii liberi, avînd masă mult mai mică decît ionii pozitivi, suferă mai puternic acțiunea câmpului electromagnetic al unei radiații luminoase. Astfel, electronii pot primi de la lumină suficientă energie pentru a învinge forțele de atracție care-i țin în interiorul metalului și pot ieși din metal sub influența luminii. Fenomenul de emisie a electronilor dintr-un metal sub influența luminii se numește *emisie fotoelectrică* sau *efect fotoelectric extern*. Studiul efectului fotoelectric se poate face cu un dispozitiv format dintr-un tub de sticlă vidat, în care se găsesc doi electrozi (fig. 13.1, a): catodul C și anodul A . Catodul este iluminat și emite electroni, care pot fi colectați de anod. În circuitul exterior se constată apariția unui curent I chiar în cazul în care între cei doi electrozi nu se aplică nici o tensiune exterioară. Aplicînd o tensiune exterioară U între catod și anod, cu polul pozitiv la anod, numărul electronilor colectați de anod în unitatea de timp crește și deci curentul I crește. Curentul I crește pe măsură ce crește tensiunea U , pînă ce atinge o *valoare de saturație* I_s , cînd toți electronii emiși de catod în unitatea de timp sînt colectați de anod (fig. 13.1, b). Aplicînd o tensiune mică cu polul negativ la anod, care frînează electronii emiși de catod, curentul I nu dispăre. Înseamnă că electronii emiși sub acțiunea luminii au energia cinetică suficientă pentru a învinge câmpul electric de frînare și a ajunge la anod. La o anumită tensiune de frînare U_0 , nici un electron nu mai poate ajunge la anod. Tensiunea U_0 corespunde punctului în care curba din

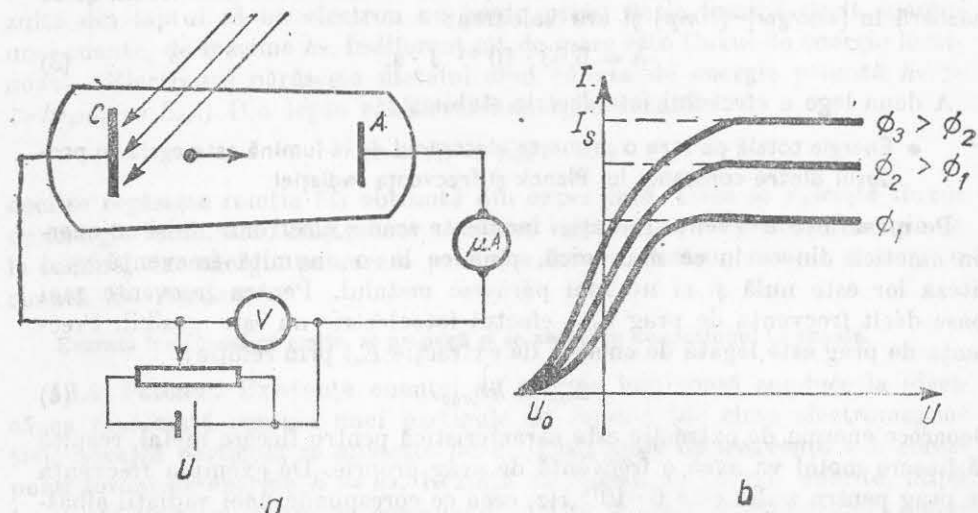


Fig. 13.1. Studiul efectului fotoelectric: a) dispozitivul; b) variația curentului în funcție de tensiunea dintre catod și anod.

figura 13.1, *b* intersectează axa absciselor. Între tensiunea U_0 și viteza electronilor emiși sub acțiunea luminii există relația:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_0. \quad (1)$$

Așadar, electronii emiși sub acțiunea luminii primesc de la lumină mai multă energie decât le este necesar pentru a ieși din metal. Surplusul de energie le rămâne sub formă de energie cinetică.

13.2. Legile efectului fotoelectric. Variind fluxul de energie luminoasă Φ ce cade pe catodul din experiența precedentă, se constată că valoarea curentului de saturație crește pe măsură ce crește fluxul de energie luminoasă (fig. 13.1, *b*). Curentul atinge valoarea de saturație cînd toți electronii emiși de catod în unitatea de timp ajung la anod. Înseamnă că pe măsură ce crește fluxul de energie luminoasă, catodul emite mai mulți electroni în unitatea de timp. Acest rezultat constituie prima lege a efectului fotoelectric:

- Numărul electronilor emiși în unitatea de timp sub acțiunea luminii este proporțional cu fluxul de energie luminoasă.

Se constată că, oricît ar crește fluxul de energie luminoasă ce cade pe catod, energia cinetică a electronilor emiși nu crește. Tensiunea de frinare U_0 la care curentul dispare este aceeași în toate cazurile (fig. 13.1, *b*). În schimb energia cinetică a electronilor crește dacă se mărește frecvența radiației ce cade pe catod. Experiențele au arătat că energia totală E_t pe care o primește electronul de la lumină, formată din energia necesară pentru extracția lui din metal E_{ex} și energia cinetică la ieșirea din metal E_c este proporțională cu frecvența luminii incidente ν :

$$E_t = E_{ex} + E_c = h\nu. \quad (2)$$

Constanta de proporționalitate h se numește constanta lui Planck. Ea nu depinde de natura materialului iradiat, este o constantă universală și se măsoară în $[energie] \cdot [timp]$ și are valoarea:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}. \quad (3)$$

A doua lege a efectului fotoelectric stabilește:

- Energia totală pe care o primește electronul de la lumină este egală cu produsul dintre constanta lui Planck și frecvența radiației.

Pe măsură ce frecvența radiației incidente scade, electronii emiși au energie cinetică din ce în ce mai mică, pînă ce la o anumită frecvență ν_{prag} viteza lor este nulă și ei nu mai părăsesc metalul. Pentru frecvențe mai joase decât frecvența de prag ν_{prag} efectul fotoelectric nu este posibil. Frecvența de prag este legată de energia de extracție E_{ex} prin relația:

$$E_{ex} = h\nu_{prag}. \quad (4)$$

Deoarece energia de extracție este caracteristică pentru fiecare metal, rezultă că fiecare metal va avea o frecvență de prag proprie. De exemplu frecvența de prag pentru sodiu este $6 \cdot 10^{14}$ Hz, ceea ce corespunde unei radiații albastre din spectrul vizibil. Pentru majoritatea metalelor, energiile de extracție fiind mai mari, frecvențele de prag sînt în domeniul ultraviolet.

13.3. Cuante de energie. Legile efectului fotoelectric, găsite experimental, nu pot fi explicate pe baza concepției clasice, ondulatorii, asupra luminii. În reprezentarea ondulatorie, propagarea continuă a undei este însoțită de propagarea continuă a energiei luminoase și electronul ar putea primi de la undă orice cantitate de energie. Cu cît fluxul de energie luminoasă este mai mare, ar fi de așteptat ca fiecare electron să primească mai multă energie de la radiația luminoasă, astfel încît, fără să crească numărul electronilor emiși, energia cinetică a electronilor emiși să fie mai mare, ceea ce, după cum s-a văzut, nu se constată experimental. În plus, în teoria ondulatorie apare inexplicabilă și legătura dintre energia primită de electroni de la unde și frecvența undelor.

Pentru explicarea legilor efectului fotoelectric a fost necesară introducerea unor ipoteze cu totul noi cu privire la emisia și absorbția luminii. Explicația legilor efectului fotoelectric a fost dată de A. Einstein în anul 1905. Conform ipotezei sale, electronii pot primi de la lumină numai anumite cantități bine determinate de energie. Energia luminoasă este absorbită deci de electroni discontinuu, în „porții” de energie. Cantitățile bine determinate de energie pe care electronii le primesc de la lumină se numesc *cuante de energie*. Valoarea unei cuante de energie depinde numai de frecvența radiației și este dată de relația:

$$E = h\nu. \quad (5)$$

Pentru prima dată noțiunea de cantă de energie a fost introdusă de Planck, care a arătat că emisia energiei luminoase (și a celorlalte radiații electromagnetice) se face discontinuu, în cantități bine determinate de energie. Einstein a extins această ipoteză și asupra absorbției luminii.

Pe baza ipotezei lui Einstein legile efectului fotoelectric pot fi ușor înțelese. Astfel, prima lege reflectă faptul că, pe măsură ce crește fluxul de energie luminoasă, crește și numărul cuantelor de energie ce pot fi absorbite și deci crește și numărul electronilor emiși în unitatea de timp. A doua lege rezultă din faptul că un electron nu poate primi de la lumină decât energia unei cuante, de mărime $h\nu$, indiferent cît de mare este fluxul de energie luminoasă. (Electronul părăsește metalul cînd cuanta de energie primită $h\nu > h\nu_{prag} = E_{ex}$.) Din legea conservării energiei rezultă:

$$h\nu = E_t = E_{ex} + E_c,$$

deci se regăsește relația (2) obținută din experiențe. Dacă se mărește fluxul de energie luminoasă, crește doar numărul electronilor ce primesc energie de la lumină, dar energia pe care o primește fiecare electron rămîne aceeași: o cantă $h\nu$. Așadar:

Energia luminoasă se emite, se propagă și se absoarbe discontinuu, în cuante.

13.4. Fotonul. Existența cuantei de energie luminoasă conduce la ideea că ea reprezintă energia unei particule de lumină (de cîmp electromagnetic). Această particulă se numește *foton*. Unei unde de frecvență ν îi corespund fotoni de energie $E = h\nu$. Rezultă că fotonii au energii diferite, după frecvența undelor cărora le corespund. Astfel, fotonii corespunzători undelor luminoase vizibile de frecvență $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Hz ($\lambda = 0,5 \mu\text{m}$) au energia

$E \approx 4 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,5 \text{ eV}$, iar fotonii corespunzători radiațiilor Röntgen de frecvență $3 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$ ($\lambda = 1 \text{ nm}$) au energie mai mare $E \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ J} = 1230 \text{ eV}$. Pe lângă energie, fotonul este caracterizat, ca orice particulă în mișcare și de impuls. Impulsul unui foton de energie h are valoarea:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (6)$$

Corpurile care absorb lumina, primesc atât energia fotonilor, cât și impulsul lor. La reflexia luminii pe suprafața unui corp, fotonii nu cedează corpului energia lor, însă își variază impulsul. Rezultă că atât la absorbție, cât și la reflexie are loc un schimb de impuls între fotonii și corpul luminat. Datorită impulsului fotonilor, lumina exercită presiune asupra corpurilor pe care cade.

De exemplu, un flux de 10^{19} fotonii/s, de lungime de undă $0,6 \text{ }\mu\text{m}$, ce cad normal pe o suprafață de 1 m^2 și sunt absorbiți, cedează într-o secundă un impuls de $\frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{19} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$; variația de impuls în unitatea de timp a acestor fotonii corespunde unei forțe de $1,1 \cdot 10^{-8} \text{ N}$, ce se exercită normal asupra suprafeței de 1 m^2 . Acești fotonii exercită deci asupra suprafeței o presiune de $1,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, cu aproximativ 12 ordine de mărime mai mică decât presiunea atmosferică. Experiențele foarte precise ale lui Lebedev au pus într-adevăr în evidență presiunea luminii. Datorită presiunii luminii, cozile cometelor, alcătuite din materie foarte puțin densă, sunt împinse în direcția și în sensul pe care se propagă lumina de la Soare. Așadar:

- Fotonul este o particulă de lumină (de câmp electromagnetic), caracterizată prin energia $h\nu$ și impulsul $\frac{h}{\lambda}$.

13.5. Lumina ca fenomen ondulatoriu și corpuscular. Efectul fotoelectric, ca și o serie de alte fenomene, ce n-au putut fi explicate pe baza teoriei ondulatorii a luminii, ci numai admitând existența fotonilor, au readus în centrul atenției concepția corpusculară asupra naturii luminii. Pe de altă parte, experiențele binecunoscute de interferență și difracție a luminii n-au putut fi explicate decât în cadrul concepției ondulatorii asupra naturii luminii. Cele două concepții sînt diametral opuse: pe cînd unda presupune o propagare continuă a energiei luminoase, fotonii presupun dimpotrivă o propagare discontinuă, în cuante, a energiei. Nici una dintre aceste două concepții nu poate explica singură toate proprietățile luminii, constatate prin experiențe. Se pune deci problema: lumina este undă sau corpuscul? A decide însă în favoarea uneia sau alteia din concepții este imposibil. Concepția materialist-dialectică rezolvă problema pe baza legii unității dialectice a contrariilor considerînd că lumina este în același timp și undă și corpuscul. În unele experiențe se manifestă cu precădere proprietățile ondulatorii, pe cînd în altele proprietățile corpusculare. În funcție de tipul experienței, proprietățile luminii sînt descrise de optica ondulatorie sau de optica fonică.

Așadar, lumina reprezintă o unitate dialectică undă-corpuscul.

B. CELULA FOTOELECTRICĂ

13.6. Construcția și funcționarea celulei fotoelectrice. Celula fotoelectrică este un dispozitiv care transformă un semnal luminos într-un semnal electric. Ea este formată dintr-un tub de sticlă vidat, în interiorul căruia se găsesc cei doi electrozi, catodul C și anodul A (fig. 13.2, a). Catodul se realizează prin depunerea unui strat metalic fotosensibil pe o porțiune a peretelui de sticlă al tubului. Ca material pentru catod se folosesc metalele alcaline Na, K și în special Cs, cu prag în domeniul radiațiilor vizibile. Pentru mărirea sensibilității se folosesc catodi din Cs și Sb. Anodul constă dintr-un inel metalic fixat în centrul tubului.

Celula este alimentată de la sursa de curent continuu cu polul pozitiv la anod. Dacă celula nu este luminată, microampermetrul din circuitul exterior nu indică nici un curent. Cînd pe catod cade un flux luminos, sînt emiși electroni și în circuitul exterior trece un curent a cărui intensitate este proporțională cu intensitatea fluxului luminos. Deoarece curentul obținut prin efect fotoelectric este mic, de numai cîțiva μA , la o intensitate a fluxului luminos de 1 lm , pentru aplicațiile practice semnalul electric dat de celula fotoelectrică trebuie amplificat. În acest scop în circuitul celulei se introduce rezistorul de sarcină R_s de valoare mare, de pe care se culege tensiunea ce va fi amplificată (fig. 13.2, b).

Un dispozitiv fotoelectric cu o sensibilitate mult mai mare decât celula fotoelectrică este fotomultiplicatorul. El se realizează prin plasarea într-un tub vidat, între anodul A și catodul C , a unor electrozi speciali $D_1, D_2, \dots$ numiți dinode (fig. 13.3). Dinodele au proprietatea de a emite electroni secundari sub acțiunea unui fascicul incident de electroni accelerați. Catodul emite sub acțiunea luminii electroni, care sînt accelerați de diferența de potențial dintre catod și prima dinodă. Fiecare electron ajuns pe dinodă provoacă emisia mai multor electroni secundari. Astfel numărul de electroni se multiplică de la dinodă la dinodă și curentul care trece prin rezistența de sarcină va fi mult mai mare decât în cazul celulei fotoelectrice.

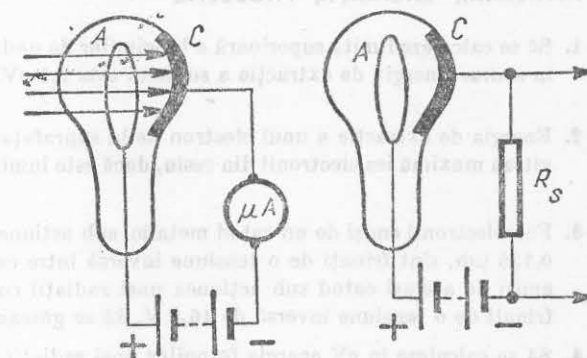


Fig. 13.2. Celula fotoelectrică.

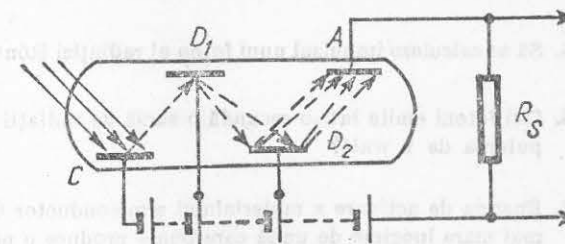


Fig. 13.3. Fotomultiplicatorul.

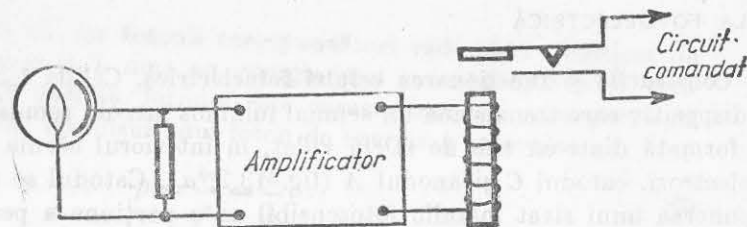


Fig. 13.4. Releu fotoelectric.

13.7. Aplicații ale celulei fotoelectrice

Releu fotoelectric. Un releu electromagnetic comandat de un fascicul luminos care cade pe o celulă fotoelectrică constituie un releu fotoelectric. Releul electromagnetic este montat la ieșirea amplificatorului care amplifică semnalul de mică putere dat de celulă (fig. 13.4). La iluminarea celulei fotoelectrice, prin înfășurarea releului electromagnetic trece curentul și releul închide circuitul ce trebuie comandat. Când se întrerupe iluminarea celulei se întrerupe și acțiunea releului. Cu releul fotoelectric se poate realiza o comandă rapidă, sigură și comodă a diferitelor operații de automatizare și control. Astfel, fotoreleele sînt folosite pentru conectarea automată a rețelei de iluminare a străzilor cînd se întuneacă, pentru avertizarea prin anumite semnale cînd izbucnește un incendiu, pentru numărarea pieselor care sînt deplasate de o bandă rulantă, pentru controlul dimensiunilor pieselor și sortarea lor după dimensiuni etc.

ÎNTREBĂRI, EXERCIȚII, PROBLEME

1. Să se calculeze limita superioară a lungimilor de undă care pot provoca efect fotoelectric în sodiu. Energia de extracție a sodiului este 2,5 eV.

Răspuns: 0,490 μm .

2. Energia de extracție a unui electron de la suprafața cesiului este de $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Cu ce viteză maximă ies electronii din cesiu, dacă este luminat cu lumină galbenă de 0,589 μm ?

Răspuns: $6 \cdot 10^6$ m/s.

3. Fotoelectronii emiși de un catod metalic, sub acțiunea unei radiații cu lungimea de undă 0,136 μm , sînt frinați de o tensiune inversă între catod și anod de 6 V. Fotoelectronii emiși de același catod sub acțiunea unei radiații cu lungimea de undă 0,1065 μm sînt frinați de o tensiune inversă de 16,5 V. Să se găsească constanta lui Planck.

Răspuns: $4,15 \cdot 10^{-8}$ eV; $4,15 \cdot 10^5$ eV.

5. Să se calculeze impulsul unui foton al radiației Röntgen cu lungimea de undă de 10^{-10} m.

Răspuns: $6,62 \cdot 10^{-24}$ kg m/s.

6. Câți fotoni emite într-o secundă o sursă de radiații infraroșii cu λ mediu de 1 μm și cu puterea de 1 watt?

Răspuns: $5 \cdot 10^{18}$ s⁻¹.

7. Energia de activare a materialului semiconductor CdS este 2,4 eV. Să se calculeze cea mai mare lungime de undă care poate produce o pereche electrongol în acest material.

Răspuns: 0,515 μm .