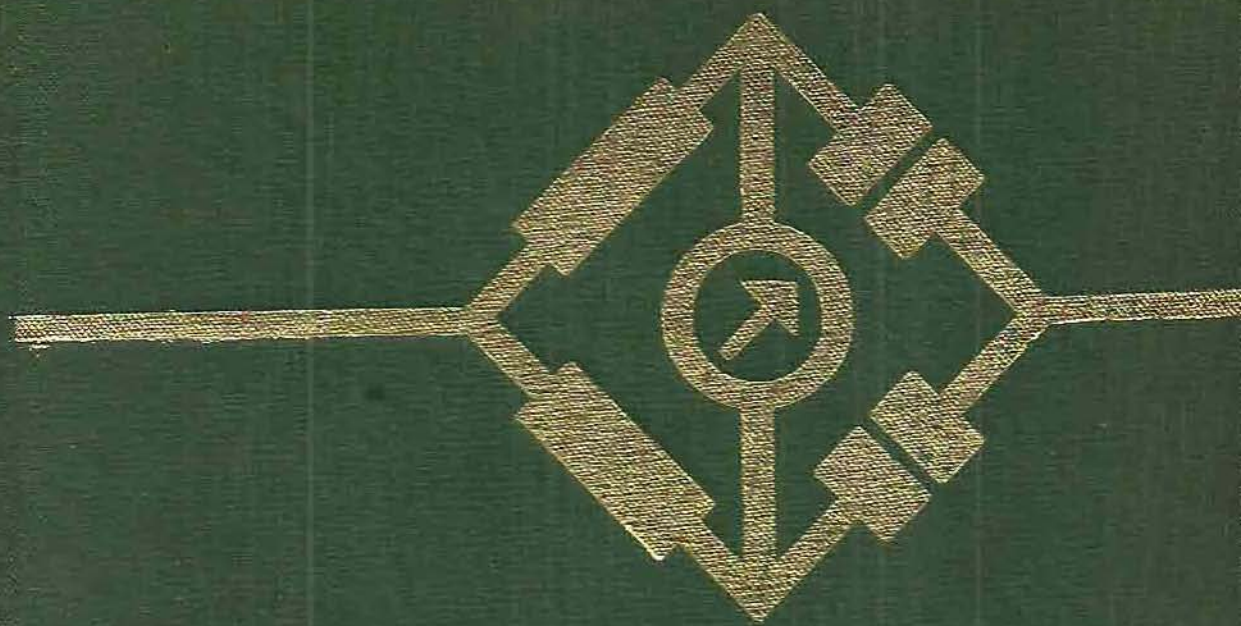




R. DORDEA
C. NITU

APARATE ȘI METODE DE MĂSURAT ȘI CONTROL

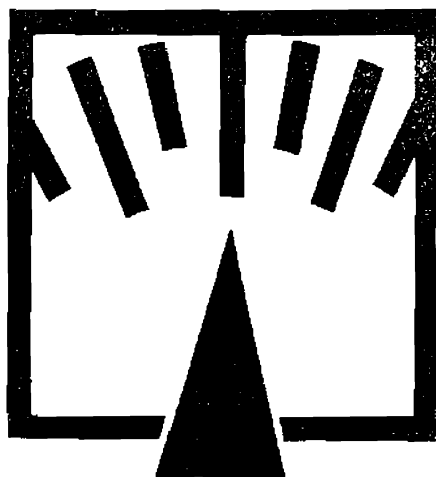
MANUAL PENTRU LICEE DE SPECIALITATE

ING. RADU DORDEA

ING. COSTICĂ NITU

APARATE ȘI METODE DE MĂSURAT ȘI CONTROL

Manual pentru licee
de specialitate



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ — BUCUREȘTI, 1969

CUPRINS

Capitolul I. Metode și mijloace de măsurare	5
A. Procesul de măsurare și elementele sale de bază	5
B. Metode de măsurare	6
C. Măsurile etalon ale unităților electrice	8
D. Erorile măsurărilor	16
 Capitolul II. Construcția și funcționarea aparatelor de măsurat electrice.	 21
A. Principiul de funcționare al aparatelor de măsurat electrice	21
B. Clasificarea aparatelor de măsurat electrice	22
C. Caracteristicile de funcționare ale aparatelor de măsurat electrice	23
D. Caracteristicile metrologice ale aparatelor de măsurat electrice	25
E. Părțile componente ale aparatelor de măsurat electrice.....	26
F. Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice	32
G. Dispozitivele de măsurat feromagnetice	34
H. Dispozitivele de măsurat electrodinamice și ferodinamice	37
I. Dispozitivele de măsurat de inducție	41
J. Dispozitivele de măsurat electrostatice	45
K. Dispozitivele de măsurat termice cu fir cald	48
L. Dispozitivele de măsurat logometrice	50
M. Erorile aparatelor de măsurat electrice	52
 Capitolul III. Măsurarea curenților și tensiunilor	 55
A. Măsurarea curenților și tensiunilor foarte mici cu ajutorul galvanometrelor	55
B. Măsurarea curenților și tensiunilor cu ajutorul ampermetrelor și voltmetrelor	61
C. Măsurarea curenților și a tensiunilor prin metode de compensație.	86
D. Transformatoare de măsurat....	92
 Capitolul IV. Măsurarea rezistențelor ..	98
A. Măsurarea rezistențelor prin metode de punte.....	98
B. Măsurarea rezistențelor prin metoda de compensație	103
C. Măsurarea rezistențelor cu metoda ampermetrului și voltmetrului..	104
D. Măsurarea rezistențelor foarte mici	105
E. Măsurarea rezistențelor cu aparate indicatoare	108
F. Determinarea locului de deteriorare a izolației unui cablu.....	110
 Capitolul V. Măsurarea inductanțelor și capacităților	 112
A. Măsurarea inductanțelor	112
B. Măsurarea inductanțelor mutuale	117
C. Măsurarea capacităților	119
 Capitolul VI. Măsurarea puterilor	128
A. Măsurarea puterii active.....	128
B. Măsurarea puterii reactive.....	138
 Capitolul VII. Măsurarea energiei electrice	143
A. Măsurarea energiei electrice active	143
B. Măsurarea energiei electrice reactive	152
 Capitolul VIII. Măsurarea factorului de putere și a frecvenței	 156
A. Măsurarea factorului de putere..	156
B. Măsurarea frecvenței	160
 Capitolul IX. Măsurarea mărimilor magnetice	 167

A. Măsurarea fluxului magnetic....	167	Capitolul XII. Măsurarea presiunilor și a debitelor	215
B. Determinarea curbei de magnetizare și a ciclului de histerezis....	172	A. Generalități	215
C. Determinarea pierderilor magnetice	180	B. Măsurarea presiunii	216
		C. Măsurarea debitelor	224
Capitolul X. Introducere în tehnica măsurării mărimilor neelectrice..	183	Capitolul XIII. Măsurarea vitezei de rotație	233
A. Generalități	183	A. Generalități	233
B. Clasificarea traductoarelor	184	B. Tahometre mecanice	233
C. Condiții impuse traductoarelor..	185	C. Tahometre electrice	235
D. Adaptoare	187	Capitolul XIV. Măsurarea umidității, viscozității și analiza gazelor	242
E. Tendințe moderne în construcția aparatelor de măsurare, control și automatizare	188	A. Măsurarea umidității	242
Capitolul XI. Măsurarea temperaturii..	190	B. Măsurarea viscozității	247
A. Generalități	190	C. Analiza gazelor	250
B. Traductoare bazate pe dilatarea termică a corpurilor solide.....	191	Capitolul XV. Măsurarea nivelului lichidelor	257
C. Traductoare bazate pe dilatarea termică a gazelor și lichidelor....	192	A. Generalități	257
D. Traductoare termoelectrice (termocupluri)	194	B. Nivelmetre bazate pe principiul vaselor comunicante	257
E. Traductoare termorezistive	202	C. Nivelmetre cu plutitor.....	258
F. Pirometre de radiație.....	207	D. Nivelmetre pneumatice	259
G. Montarea traductoarelor de temperatură	212	E. Nivelmetre electrice	260
		F. Nivelmetre cu radiații radioactive	261
		G. Nivelmetre cu ultrasunete	262

Capitolul I

METODE ȘI MIJLOACE DE MĂSURARE

A. PROCESUL DE MĂSURARE ȘI ELEMENTELE SALE DE BAZĂ

Orice corp sau fenomen fizic se caracterizează printr-o serie de proprietăți fizice (masă, lungime, viteză, volum etc.), care se exprimă sub forma unor mărimi fizice. Mărimea fizică are o dimensiune fizică, avînd totodată proprietatea esențială de a putea fi mai mare sau mai mică, de a putea crește sau descrește. Între diferitele mărimi fizice care intră în componența unui fenomen fizic există anumite relații fizice care se exprimă de obicei sub forma unor ecuații matematice, în care mărimile sînt reprezentate prin simboluri literale.

Aprecierea cantitativă a proprietăților diferitelor corpuri sau fenomene se realizează prin măsurarea mărimilor fizice.

A *măsura* o mărime înseamnă a o compara cu o altă mărime de aceeași natură, luată convențional ca unitate de comparație. Raportul dintre mărimea de măsurat A și unitatea de măsură a se numește *valoarea mărimii* α :

$$\alpha = \frac{A}{a} \quad (1-1)$$

de unde:

$$A = \alpha a, \quad (1-2)$$

adică: *mărimea este egală cu produsul dintre unitatea de măsură și valoarea sa.*

Mărimea și unitatea sînt noțiuni fizice, pe cînd valoarea, fiind raportul dintre două mărimi de același fel, este un simplu număr fără dimensiuni. Mărimea nu variază cu unitatea aleasă; valoarea variază invers proporțional cu aceasta.

În procesul de măsurare intervin următoarele elemente:

- *obiectul măsurării*: mărimea de măsurat;
- *metoda de măsurare*: modul de comparare a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură;
- *mijloacele de măsurare*: totalitatea mijloacelor tehnice cu ajutorul cărora se determină cantitativ mărimea de măsurat și care se împart în *măsururi* și *aparate de măsurat*.

Pentru a măsura o mărime trebuie să se stabilească în prealabil unitatea de măsură a acelei mărimi și apoi să existe mijloacele tehnice care să permită compararea mărimii cu unitatea ei.

Unitatea de măsură trebuie să fie de aceeași natură cu mărimea de măsurat. Dimensiunea unității poate fi aleasă oarecare dar o dată acceptată ea trebuie să rămână neschimbată. Unitățile de măsură se stabilesc în fiecare țară prin legi speciale. Generalizarea unităților de măsură pe scară mondială se reglementează prin acord internațional (de exemplu Conferința Generală de Măsuri și Greutăți din 1889).

Unitatea de măsură aleasă trebuie să fie reprodusă fizic, pentru a se putea compara cu ea mărimile de măsurat. Mijloacele de măsurare care materializează unitatea de măsură sau valorile multiple ale acesteia se numesc *măsururi*.

Mijloacele de măsurare necesare pentru efectuarea măsurărilor cu ajutorul cărora se realizează compararea directă sau indirectă a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură se numesc *aparate de măsurat*. Alegerea acestora depinde de metoda de măsurare utilizată.

Unele mijloace de măsurare servesc la păstrarea unităților de măsură și la transmiterea acestora la alte mijloace de măsurare și poartă denumirea de *mijloace de măsurare etalon* sau *etalioane* spre deosebire de restul mijloacelor de măsurare, care servesc la măsurări curente și poartă denumirea de *mijloace de măsurare de lucru*.

Mijloacele de măsurare de lucru se împart în *mijloace de măsurare de laborator* și *mijloace de măsurare tehnice*.

B. METODE DE MĂSURARE

Metodele de măsurare se clasifică după mai multe criterii:

a. **După modul de obținere a valorii numerice a mărimii de măsurat**, metodele de măsurare se împart în trei grupe: metode directe, indirecte și combinate.

Metodele de măsurare directe sînt acelea prin care mărimea de măsurat se compară direct cu unitatea de măsură sau cu un aparat de măsurat gradat în unitățile respective, rezultatul fiind obținut direct în unități de măsură. De exemplu, măsurarea curentului electric cu ampermetrul sau a rezistențelor cu ajutorul punților.

Metodele de măsurare directă sînt cele mai numeroase, constituind baza măsurării tuturor mărimilor fizice. Aceste metode se împart în două grupe principale: metode de citire și metode de comparație.

— *Metodele de citire* constau în determinarea mărimii de măsurat prin citirea valorii acesteia pe scara gradată a unui aparat de măsurat. În acest caz, scara aparatului de măsurat este gradată direct în unități ale mărimii de măsurat.

Metodele de citire sînt foarte răspîndite în tehnica măsurărilor electrice, fiind folosite în toate cazurile în care nu este necesară o precizie mare a măsurilor.

— *Metodele de comparație* constau în determinarea mărimii de măsurat prin compararea ei cu una sau mai multe măsuri. Această comparare se poate face prin trei metode: metoda de zero, metoda diferențială și metoda de substituție.

La *metoda de zero* (sau de *compensație*) efectul acțiunii mărimii de măsurat este compensat (reduc la zero) de efectul acțiunii unei măsuri sau mărimi cunoscute de același fel. Compensarea (echilibrarea) efectului mărimii de măsurat cu cel al măsurii sau mărimii cunoscute se manifestă prin dispariția unui fenomen sau a unei mărimi (curent, tensiune etc.) într-o porțiune a circuitului de măsurare și se determină cu foarte mare precizie cu ajutorul aparatelor de zero.

Ca exemplu de metodă de zero este măsurarea rezistențelor electrice cu ajutorul punții echilibrate sau măsurarea forței electromotoare prin compensarea acesteia cu forța electromotoare a unui element normal (cu ajutorul compensatoarelor).

La *metoda diferențială* mărimea de măsurat se compară cu o măsură sau mărime cunoscută, valoarea ei rezultînd din diferența dintre efectele simultane ale celor două mărimi asupra aparatului de măsurat.

Ca exemplu de metodă diferențială este metoda de determinare a pierderilor în oțel.

La *metoda de substituție* mărimea de măsurat se compară cu o măsură sau mărime cunoscută, substituind în montajul de măsurare pe una cu cealaltă și urmărind obținerea aceluiasi efect asupra aparatului de măsurat în ambele cazuri. Cînd cele două mărimi produc efecte calitativ și cantitativ identice, ele sînt egale.

De exemplu, la măsurarea rezistențelor prin această metodă, se introduce în schemă, în locul rezistenței de măsurat, o cutie de rezistențe cu valori cunoscute, care se variază căutînd să se obțină aceeași indicație a aparatului de măsurat ca în cazul cînd schema conținea rezistența de măsurat.

Cele mai importante și mai răspîndite aparate de comparație sînt punțile echilibrate și compensatoarele.

Metodele de măsurare indirecte sînt metodele prin care nu se măsoară direct mărimea de măsurat, ci alte mărimi de care aceasta este legată printr-o relație fizică cunoscută, rezultatul măsurării obținîndu-se prin calcul. Un exemplu îl constituie determinarea rezistențelor cu voltmetrul și ampermetrul din raportul dintre valorile tensiunii și curentului măsurate direct cu cele două aparate.

Metodele de măsurare combinate sînt metodele în care rezultatul se deduce din rezultatele mai multor măsurări, directe sau indirecte, executate în condiții diferite, ale aceleiași mărimi sau ale cîtorva mărimi de același fel. Valoarea numerică a mărimii de măsurat se determină prin rezolvarea seriei de ecuații în care sînt incluse rezultatele obținute. Un exemplu îl constituie separarea pierderilor magnetice în tole, în pierderi prin histerezis și

pierderi prin curenți turbionari, prin măsurarea pierderilor pentru două frecvențe diferite.

b. După caracterul măsurării în timp a mărimilor de măsurat, metodele de măsurare se împart în *măsurări continue* și *măsurări discrete*. În cazul măsurărilor continue mărimea de măsurat se măsoară continuu în timp, în fiecare moment obținându-se valoarea sa, rezultatele fiind astfel disponibile în permanență. În cazul măsurărilor discrete, mărimea de măsurat se măsoară numai la anumite intervale de timp, valorile obținute corespunzând numai anumitor momente bine definite.

c. După precizia de măsurare se deosebesc *metode de măsurare de laborator* și *metode tehnice (industriale)*. Măsurările de laborator se efectuează folosind metode și mijloace de măsurare de mare precizie și necesită determinarea erorii de măsurare. Măsurările industriale se efectuează folosind metode și mijloace de măsurare de precizie mai mică, admisibilă pentru scopul practic respectiv și nu necesită determinarea erorii de măsurare.

C. MĂSURILE ETALON ALE UNITĂȚILOR ELECTRICE

1. SISTEME DE UNITĂȚI

Mărimile fizice se împart în două categorii: *mărimi fundamentale* și *mărimi derivate*. Prin mărimi fundamentale se înțeleg mărimile independente sau distincte, cu ajutorul cărora se definesc alte mărimi, numite mărimi derivate. Mărimile fundamentale sînt alese arbitrar și convențional. Astfel sînt alese ca mărimi fundamentale lungimea, masa, timpul, curentul electric etc. Numărul mărimilor fundamentale este limitat.

O condiție care se impune mărimilor fundamentale este să dea posibilitatea ca unitățile de măsură care li se atribuie să poată fi determinate cu cea mai mare exactitate.

Unitățile de măsură ale mărimilor fundamentale se numesc *unități fundamentale*. Unitățile mărimilor derivate se numesc *unități derivate*. Valorile sau dimensiunile unităților derivate depind de valorile unităților fundamentale, de care sînt legate prin ecuațiile de definiție ale mărimilor respective.

Totalitatea unităților fundamentale și derivate folosite într-un domeniu oarecare de măsurare se numește *sistem de unități*.

Sistemele de unități diferă între ele în funcție de unitățile fundamentale adoptate.

Sistemul de unități de măsură legal și obligatoriu în Republica Socialistă România este *Sistemul Internațional de Unități de Măsură*, cu simbolul SI. Acest sistem a fost adoptat în octombrie 1960 de a XI-a Conferință Generală

de Măsură și Greutăți de la Paris. Unitățile fundamentale ale acestui sistem sînt:

- *metrul*, pentru lungimisimbol m ;
- *kilogramul*, pentru masăsimbol kg ;
- *secunda*, pentru timpsimbol s ;
- *amperul*, pentru intensitatea curentului electricsimbol A ;
- *gradul Kelvin*, pentru temperatura termodinamicăsimbol °K ;
- *candela*, pentru intensitatea luminoasă...simbol cd.

În Sistemul Internațional de Unități SI amperul este singura unitate electrică fundamentală. Toate celelalte Unități de mărimilor electrice și magnetice se definesc în funcție de unitatea electrică fundamentală — amperul — și de cele trei unități mecanice fundamentale — metrul, kilogramul și secunda.

Definiția amperului ca unitate fundamentală a fost adoptată la cea de-a 9-a Conferință Generală de Măsură și Greutăți din 1948 și a fost păstrată și la alcătuirea Sistemului Internațional de Unități. Definiția se bazează pe interacțiunea dintre doi curenți și are următoarea formulare: „Amperul este intensitatea unui curent electric constant, care, menținut în două conductoare paralele, rectilinii, de lungime infinită și de secțiune circulară neglijabilă, așezate în vid la o distanță de un metru unul de altul, ar produce între aceste două conductoare o forță egală cu $2 \cdot 10^{-7}$ kg.m.s.⁻² (newtoni pe metru de lungime)“. Această definiție a fost determinată de faptul că în prezent forța care apare între două conductoare parcurse de curent se poate măsura cu mare precizie.

Pînă la adoptarea Sistemului Internațional de unități, în electricitate și în magnetism s-au folosit sistemele de unități CGS electrostatic, CGS electromagnetic și practic MKSA.

Sistemul CGS electrostatic (CGS ϵ_0) are ca unități fundamentale centimetrul, gramul, secunda și unitatea de permitivitate electrică a vidului ϵ_0 (care se ia egală cu unitatea).

Sistemul CGS electromagnetic (CGS μ_0) are ca unități fundamentale centimetrul, gramul, secunda și unitatea de permeabilitate magnetică a vidului μ_0 (care se consideră egală cu unitatea).

Sistemul practic MKSA are ca unități fundamentale metrul, kilogramul, secunda și amperul. Sistemul practic MKSA este o parte din Sistemul Internațional (SI) acoperind numai domeniul mecanicii, electricității și magnetismului.

Sistemul CGS electromagnetic și sistemul practic MKSA prezintă în electricitate și magnetism cîte două variante: varianta clasică (sau neraționalizată) și varianta raționalizată. Varianta raționalizată diferă de cea neraționalizată prin faptul că elimină factorul 4π care există în varianta neraționalizată într-o serie de relații mai frecvent folosite și care în schimb apare în unele relații raționalizate cu utilizare mai restrînsă. Sistemul Internațional SI prevede numai unități raționalizate.

2. MĂSURILE ETALON ALE UNITĂȚILOR ELECTRICE

Măsurile etalon sau etaloanele sînt folosite la păstrarea și transmiterea unităților de măsură la alte mijloace de măsurare sau la verificarea și gradarea oricărui fel de măsuri și aparate de măsurat.

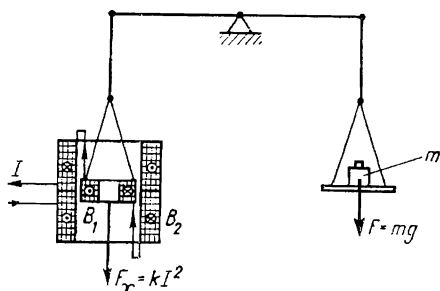


Fig. 1—1. Balanța de curent.

pentru rezistență, inductanță și capacitate. Dintre acestea etalonul unității de intensitate a curentului este etalon fundamental, deoarece se stabilește în funcție numai de mărimile mecanice fundamentale. Celelalte etaloane ale unităților mărimilor electrice sînt etaloane derivate și din mărimea electrică fundamentală — intensitatea curentului electric.

a) **Etalonul unității de intensitate a curentului.** Unitatea fundamentală a intensității curentului electric se reproduce cu ajutorul unei instalații etalon numită *balanța de curent*, a cărei construcție se bazează pe interacțiunea curenților care trec prin două bobine.

Balanța de curent (fig. 1-1) constă în principiu dintr-o balanță de precizie cu brațe egale și două bobine cilindrice concentrice, una fixă B_2 și alta mobilă B_1 , suspendată de un braț al balanței, conectate în serie. Forța de atracție $F_x = kI^2$ dintre cele două bobine, care apare cînd acestea sînt parcurse de un curent I , se măsoară cu ajutorul balanței. Intensitatea curentului I rezultă din ecuația de echilibru a balanței:

$$I^2 = \frac{mg}{k}, \quad (1-3)$$

în care: m este masa greutăților care echilibrează forța de interacțiune F_x ; g — accelerația gravitației; k — o constantă care depinde de dimensiunile geometrice ale bobinelor.

Astfel, intensitatea curentului se exprimă numai în funcție de mărimi mecanice: masa greutăților de echilibrare, accelerația gravitației și dimensiunile geometrice ale bobinelor.

Determinările cu balanța de curent se efectuează în vid. Precizia de măsurare a balanțelor de curent este de ordinul $10^{-5} \dots 10^{-6}$.

b) **Etalonul de forță electromotoare.** Etalonul de forță electromotoare este reprezentat de *elementul normal Weston*. Aceasta este o sursă de forță electromotoare continuă foarte stabilă în timp (cu condiția să nu debiteze curent), a cărei valoare este cuprinsă între 1,01855 V_{abs} și 1,01875 V_{abs} , la temperatura de 20°C.

Elementul Weston (fig. 1-2) constă dintr-un vas de sticlă în formă de H, închis etanș, avînd în partea inferioară doi electrozi de platină. Anodul este din mercur avînd deasupra o pastă depolarizantă de amestec de sulfat mercur-

ros (Hg_2SO_4) și cristale de sulfat de cadmiu ($\text{Cd SO}_4 + \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$). Catodul este din amalgam de cadmiu (cu 12% Cd). Deasupra anodului și catodului se găsește electrolitul, alcătuit dintr-o soluție de sulfat de cadmiu, care umple

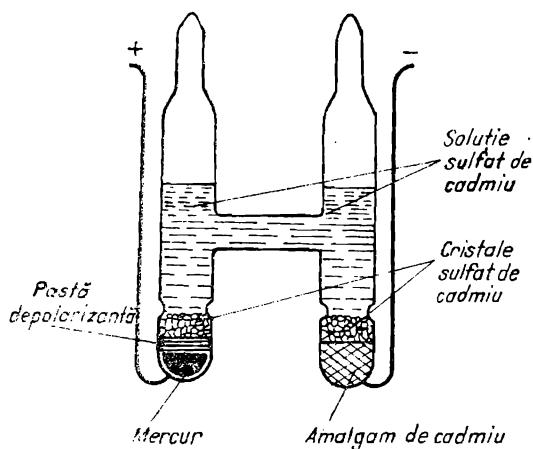


Fig. 1—2. Element Weston.

și puntea dintre brațele vasului. Rezistența interioară a elementului este cuprinsă între 500 Ω și 1 000 Ω .

Elementele Weston sînt de două tipuri, după cum soluția de sulfat de cadmiu este saturată sau nesaturată la temperatura de utilizare a elementului. Elementele Weston saturate spre deosebire de cele nesaturate au deasupra anodului și catodului un strat de cristale de sulfat de cadmiu care asigură saturația soluției. Elementele Weston saturate au o stabilitate în timp mult mai mare decît cele nesaturate. Elementele Weston nesaturate au rezistența interioară mai mică (sub 600 Ω) decît cele saturate.

Elementele Weston sînt foarte puțin robuste și foarte sensibile la acțiunile exterioare. Ele trebuie ferite de șocuri, de vibrații și de acțiunea luminii și a căldurii, trebuie păstrate la temperatură constantă și este interzisă trecerea prin ele sau debitarea de curenți mai mari de 1 μA .

c) **Etalonul de rezistență electrică.** Etaloanele de rezistență electrică, cunoscute și sub denumirea de *rezistențe etalon*, constau din conductoare electrice metalice care, în condiții prescrise de temperatură, umiditate și disiparea căldurii produsă prin efect Joule, la trecerea unui curent electric continuu constant, prezintă o rezistență electrică constantă. Ele trebuie să aibă o cît mai mare stabilitate a rezistenței lor în timp, o abatere cît mai mică a valorii lor adevărate față de valoarea nominală, un coeficient de variație a rezistenței cu temperatura cît mai redus o forță termoelectromotoare în asociație cu cuprul cît mai redusă și să prezinte inductanță și capacitate cît mai mici la folosirea în curent alternativ.

Rezistențele etalon se construiesc în general din sîrmă sau bandă de manganină bobinată pe un suport izolant. Manganina este un aliaj cu 84% cupru,

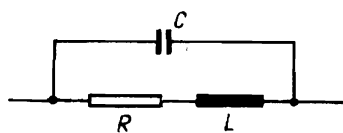


Fig. 1—3. Schema echivalentă a unei rezistențe etalon în curent alternativ.

nominale sub $10^{-1} \Omega$ se execută din bandă sau plăcuțe de manganină, iar cele cu valori mai mari, din sîrmă.

Valorile nominale ale rezistențelor etalon sînt determinate — și deci valabile cu precizia lor maximă — în curent continuu. În curent alternativ rezistențele au o inductanță proprie L , determinată de energia magnetică înmagazinată în spațiul înconjurător al bobinei ce constituie rezistența, și o capacitate proprie C , datorită vecinătății spirelor între care există o diferență de potențial electric. Astfel, în curent alternativ rezistența electrică se comportă ca o impedanță, a cărei schemă echivalentă poate fi reprezentată sub formă simplificată ca în figura 1-3. Elementele componente ale schemei echivalente variază cu frecvența datorită în special efectului pelicular și creșterii pierderilor în dielectric cu frecvența. În acest caz elementele parazite sînt inductanța L și capacitatea C care trebuie să fie cît mai mici în raport cu rezistența. În scopul micșorării inductanței și capacității proprii, rezistențele etalon se execută pe suporturi izolante din mică, cu bobinaj bifilar realizat cu fir în-doit (fig. 1-4, *a*) sau cu bobinajul Ayrton-Perry (fig. 1-4, *b*) cu două fire în paralel și bobinate în sens invers.

Rezistențele etalon se construiesc cu valoare unică sau cu valori multiple, sub forma cutiilor de rezistență. În figura 1-5 este reprezentată o rezistență etalon cu valoare unică.

Cutiile de rezistențe constau din mai multe rezistențe individuale, de valori diferite, legate în serie, care se introduc în circuit cu ajutorul unor fișe (fig. 1-6, *a*) sau manete (fig. 1-6, *b*).

Cutiile de rezistențe se construiesc în general ca rezistențe în decade. Fiecare decadă conține zece rezistențe de aceeași valoare (de $0,1 \Omega$, respectiv

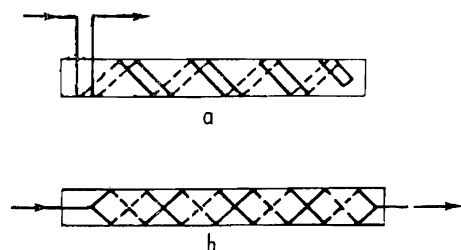


Fig. 1—4. Bobinajul bifilar al rezistențelor etalon.

12% mangan și 4% nichel; acest aliaj are coeficientul de variație a rezistenței cu temperatura de o sută de ori mai mic decît cuprul, o mare stabilitate în timp și o rezistivitate de 25 ori mai mare decît a cuprului ($0,42 - 0,46 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$).

Rezistențele etalon se construiesc cu valori nominale de 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1 , 10 , 10^2 , 10^3 , 10^4 și $10^5 \Omega$. Rezistențele etalon cu valori

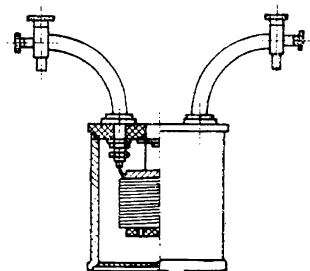


Fig. 1—5. Rezistența etalon.

1 Ω , 10 Ω etc.) montate în serie, valoarea dorită obținându-se prin introducerea unei fișe în locașul corespunzător (fig. 1-6, a) sau prin rotirea manetei pe plotul corespunzător (fig. 1-6, b).

d) **Etalonul de inductanță și inductanță mutuală.** Etaloanele de inductanță (fig. 1-7), denumite și *bobine de inductanță etalon*, constau din bobine

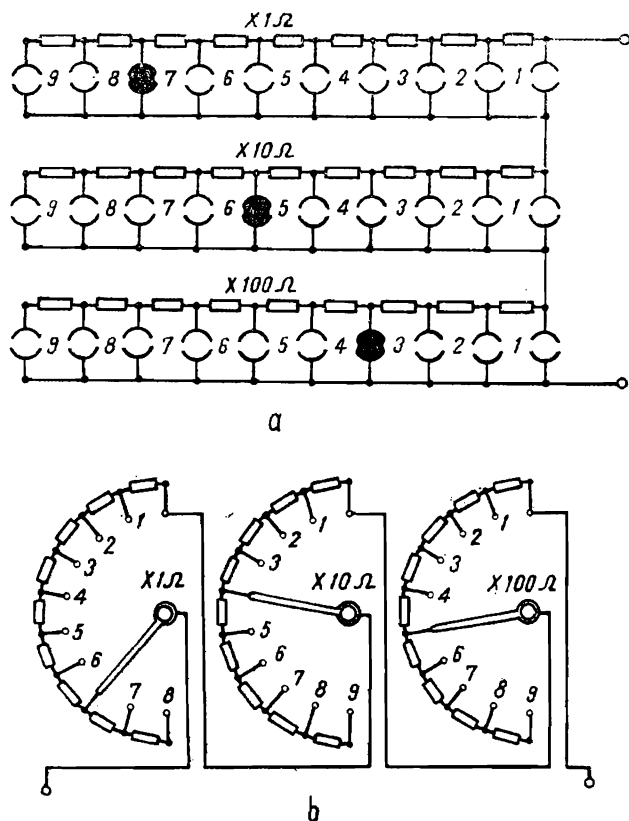


Fig. 1-6. Schema cutiilor de rezistențe în decade.

plate confecționate din sîrmă de cupru izolată și înfășurată monofilar pe o carcasă cilindrică de porțelan sau de marmură. Bobinele de inductanță mutuală sînt realizate la fel, însă cu cîte două înfășurări pe aceeași carcasă.

Schema echivalentă a bobinelor de inductanță este identică cu cea a rezistențelor etalon, reprezentată în figura 1-3. În acest caz elementele parazite sînt rezistența și capacitatea care trebuie să fie cît mai mici în raport cu inductanța. Pentru ca rezistența să fie cît mai mică, bobinele de inductanță se realizează sub forma unui bobinaj cilindric plat în mai multe straturi. Reducerea capacității parazite, care provine din capacitățile distribuite între spiarele bobinei, se obține prin mărirea distanței între straturile înfășurării, prin

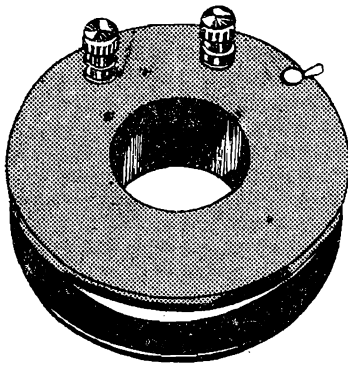


Fig. 1—7. Bobina de inducție etalon.

micșorarea numărului de spire pe strat și prin reducerea tensiunii între spirele vecine.

Bobinele de inductanță etalon trebuie să aibă o variație cât mai mică a inductanței cu intensitatea și frecvența curentului care le parcurge, un coeficient de temperatură cât mai mic, o cât mai bună stabilitate în timp și dimensiuni reduse. Pentru ca inductanța să nu depindă de intensitatea curentului, bobinele se execută cu materiale diamagnetice. Pentru a înlătura influența frecvenței care se manifestă în special prin creșterea pierderilor în înfășurare prin efect pelicular, bobinajul se execută cu conductor multifilar, alcătuit dintr-un număr mare de conductoare subțiri și izolate.

Bobinele de inductanță etalon se confecționează în general pentru valori nominale cuprinse între 0,0001 și 10 H, cu clase de precizie între 0,05 și 0,5.

Ca și rezistențele etalon, inductanțele etalon se construiesc cu valoare unică sau cu valori multiple, sub forma cutiilor de inductanțe. Cutiile se realizează de obicei în decade, cu fișe sau cu manete. În figura 1-8 este reprezentată schematic o cutie de inductanțe cu manete. Bobinele de inductanțe din cutie sînt toroidale și ecranate pentru a se evita influențele reciproce dintre ele. Fiecărei bobine i se asociază cîte o rezistență etalon, astfel încît rezistența totală a cutiei să rămînă constantă, indiferent de valoarea inductanței stabilită cu ajutorul fișelor sau manetelor.

Se construiesc, de asemenea, bobine de inductanță etalon cu variație continuă a valorii inductanței, denumită *variometre* (fig. 1-9). Acestea sînt alcătuite din două bobine concentrice și coaxiale, dintre care una se poate roti în interiorul celeilalte.

Inductanța mutuală M dintre bobine variază cu poziția relativă a acestora între 0 și $\pm M_{max}$. În cazul conectării celor două bobine în serie, inductanța totală a variometrului este $L = L_1 + L_2 \pm 2M$. Valoarea acesteia variază

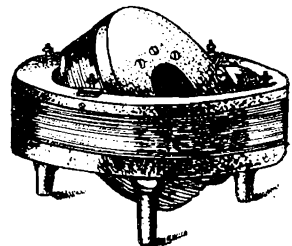
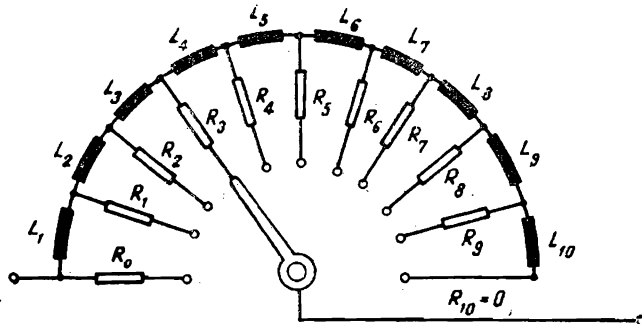


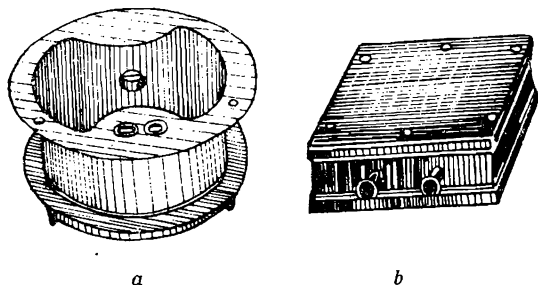
Fig. 1—8. Schema cutiilor de inductanțe etalon cu manete.

Fig. 1—9. Variometru.

continuu cu poziția relativă a celor două bobine între $L_{min} = L_1 + L_2 - 2M_{max}$ și $L_{max} = L_1 + L_2 + 2M_{max}$ ca urmare a variației inductanței mutuale M (inductanțele proprii L_1 și L_2 ale bobinelor fiind constante).

e) **Etalonul de capacitate.** Etaloanele de capacitate constau din condensatoare etalon care au o mare stabilitate în timp a valorii capacității, coefici-

Fig. 1—10. Condensatoare etalon.



ent mic de temperatură, o variație cât mai mică a capacității cu frecvența și forma curentului, pierderi dielectrice cât mai mici și rezistență de izolație foarte mare.

Condensatoarele etalon se construiesc cu dielectric de aer sau de mică. Condensatoarele cu aer au o bună stabilitate în timp, pierderi mici în dielectric ($\operatorname{tg} \delta < 10^{-4}$ la frecvența de 1 000 Hz) și coeficient de temperatură redus (de ordinul 10^{-5} $1/^{\circ}\text{C}$), dar au dimensiuni mari la capacități mari. Pentru acest motiv condensatoarele cu aer se construiesc pentru valori mici ale valorii capacității: de la 10 pF pînă la 0,01 μF . Pentru capacități mai mari (de la 0,001 μF pînă la 1 μF) se folosesc condensatoarele etalon cu dielectric de mică. Aceste condensatoare au caracteristici ceva mai slabe decît cele cu aer ($\operatorname{tg} \delta = 10^{-4} \dots 10^{-3}$, coeficientul de temperatură $5 \cdot 10^{-4}$ $1/^{\circ}\text{C}$), dar dimensiunile lor sînt mult mai mici. Temperatura de utilizare a condensatoarelor etalon este de $+20^{\circ}\text{C}$, iar frecvența de 800 — 1 000 Hz. Precizia maximă este $\pm 1^{\circ}/_{\circ}$.

Condensatoarele cu aer (fig. 1-10, a) se construiesc cu armături cilindrice, plate, fixate și menținute la o distanță constantă una de alta cu garnituri izo-lante din chihlimbar, mică sau cuarț. Condensatorul este introdus într-o cutie metalică care are și rol de ecran.

Condensatoarele etalon cu mică (fig. 1-10, b) sînt alcătuite dintr-o serie de plăci metalice (foi de staniol sau de aluminiu), dreptunghiulare separate prin foite de mică. Plăcile de număr par sînt conectate în paralel la una din bornele condensatorului, iar cele de număr impar la cea de-a doua bornă.

Schema echivalentă a unui condensator etalon include pe lîngă capacitatea sa proprie, rezistența armăturilor și a conductoarelor de legătură, inductanța determinată de energia magnetică înmagazinată în cîmpul magnetic, capacitatea parazită față de masă a armăturilor și rezistența corespunzătoare pierderilor în dielectric. În afară de rezistența corespunzătoare pierderilor în dielectric, ceilalți parametri intervin mai ales la frecvențe foarte mari. Schema echivalentă poate fi reprezentată ca în figura 1-11, în care se consideră

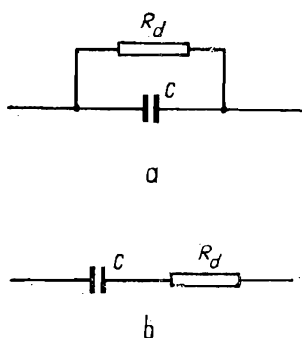


Fig. 1—11. Schemele echivalente simplificate ale condensatoarelor etalon.

numai rezistența R_d corespunzătoare pierderilor în dielectric legată în derivație (fig. 1-11, *a*) sau în serie (fig. 1-11, *b*) cu condensatorul C .

Condensatoarele etalon se construiesc cu valoare unică (fig. 1-10) sau cu valori multiple (fig. 1-12), sub forma cutiilor de condensatoare sau a condensatoarelor variabile.

Cutiile de condensatoare (fig. 1-12, *a* și *b*) sînt alcătuite din mai multe condensatoare de capacități diferite, care se pot lega între ele în paralel (și uneori în serie) cu ajutorul unor fișe sau manete, obținându-se astfel diferite valori ale capacității totale.

Condensatoarele etalon variabile (fig. 1-12, *c*) sînt alcătuite din mai multe plăci fixe, între care se deplasează, prin rotirea unui miner, plăci mobile. În acest fel variază suprafața activă a condensatorului și totodată valoarea capacității sale. Ca dielectric se folosește aerul sau uleiul de vaselină.

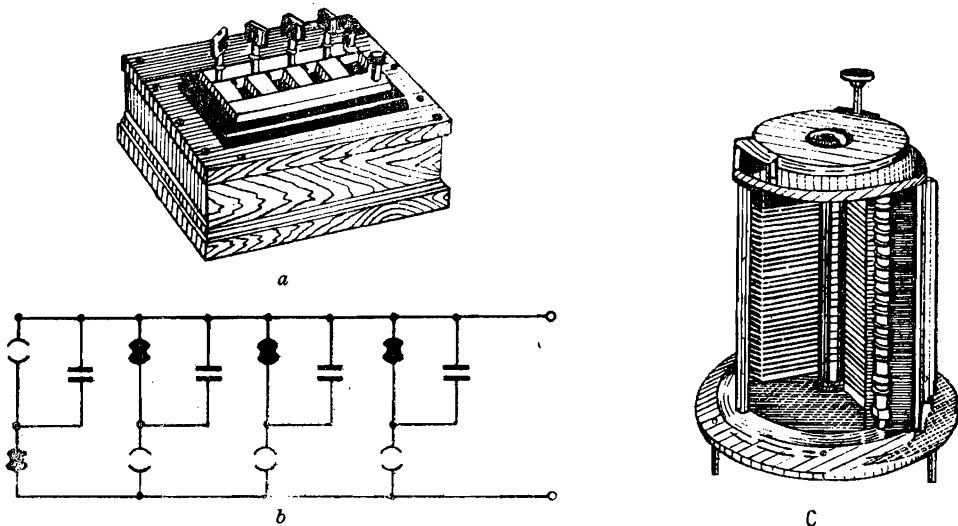


Fig. 1—12 Condensatoare etalon cu valori multiple.

D. ERORILE MĂSURĂRILOR

Prin efectuarea unei măsurări, oricît de precise ar fi aparatele de măsurat și metodele de măsurare, nu se obține niciodată valoarea adevărată a mărimii de măsurat. Datorită diferitelor cauze, rezultatele măsurărilor dau valori mai mult sau mai puțin apropiate de valoarea adevărată a mărimii de măsurat.

Diferența dintre rezultatele măsurării și valoarea adevărată a mărimii de măsurat se numește *eroare de măsurare*.

Se numește *valoare adevărată* X a unei mărimi valoarea exactă a acelei mărimi, care s-ar obține dacă măsurarea nu ar fi însoțită de nici o eroare; dar cum orice măsurare este însoțită de erori, valoarea adevărată nu poate fi obținută practic.

Se numește *valoare efectivă* X_e a unei mărimi valoarea obținută prin măsurări de precizie cu mijloace de măsurare etalon.

Se numește *valoare individuală măsurată* x (sau l) a unei mărimi valoarea determinată printr-o măsurare oarecare. Într-un șir de măsurări efectuate asupra aceleiași mărimi, în aceleași condiții, valoarea individuală se simbolizează prin x_i (sau l_i).

Întrucât valoarea adevărată nu poate fi determinată niciodată, *eroarea de măsurare* (sau *eroarea absolută*) Δ a unei mărimi este dată de diferența dintre valoarea x a mărimii găsită prin măsurare și o *valoare de referință* X_0 , determinată cu o precizie superioară valorii măsurate, care poate fi sau valoarea medie a unui șir de măsurări, sau valoarea efectivă:

$$\Delta = x - X_0. \quad (1-4)$$

Eroarea de măsurare este de aceeași natură ca și mărimea de măsurat și ca urmare se exprimă în aceleași unități de măsură.

Eroarea de măsurare nu exprimă gradul de precizie al măsurării; acesta este dat de *eroarea relativă* Δ_r , care este raportul dintre eroarea de măsurare Δ și valoarea de referință adoptată X_0 :

$$\Delta_r = \frac{\Delta}{X_0} = \frac{x - X_0}{X_0}. \quad (1-5)$$

Eroarea relativă, fiind raportul a două mărimi de aceeași natură, este un număr și se exprimă de obicei în procente. Cu cât eroarea relativă este mai mică cu atât măsurarea este mai precisă.

Cauzele care determină erorile și caracterul lor sînt extrem de diferite. Erorile apar datorită imperfecțiunii mijloacelor de măsurare sau metodelor de măsurare, inconstanței condițiilor în care se efectuează măsurarea, lipsei de experiență și greșelilor operatorului etc. Pentru obținerea unor rezultate cît mai apropiate de valoarea adevărată a mărimii de măsurat este necesar ca influența acestor cauze să fie cît mai mult micșorată sau erorile să fie eliminate prin calcul.

Orice măsurare este susceptibilă de trei feluri de erori: erori sistematice, erori întîmplătoare și greșeli.

a) **Erorile sistematice** Δ , sînt erorile care au în fiecare caz o valoare determinată (constantă sau variabilă după o anumită lege) și un semn precis. Erorile sistematice cuprind erorile controlabile ale aparatelor de măsurat și ale metodelor de măsurare, ca și acelea care depind de influențele măsurabile ale mediului exterior. Ele sînt sensibil constante pentru un șir de măsurări efectuate asupra aceleiași mărimi în aceleași condiții și sînt totdeauna în același sens.

Se deosebesc următoarele erori sistematice:

— *erori instrumentale*, cauzate de imperfecțiunile constructive ale mijloacelor de măsurat, ca defecte ale diferitelor piese componente importante, scări gradate greșite, reglări inițiale greșite etc.;

— *erori de metodă*, datorate lipsei de precizie a metodei de măsurare sau aplicării unei formule de calcul aproximative;

— *erori de instalare*, produse de așezarea sau reglarea greșită a aparatelor de măsurat sau a altor dispozitive de măsurat și modificarea condițiilor exterioare;

— *erori personale*, provocate de unele defecte personale ale experimentatorului.

Erorile sistematice pot fi reduse la valori neglijabile printr-o etalonare corectă a aparatelor de măsurat, prin aplicarea corecțiilor impuse de erorile sistematice de metodă, printr-o așezare corectă a aparatelor etc.

b) **Erorile întâmplătoare** sînt erorile ale căror valori și semne variază la întîmplare, într-un șir de valori măsurate ale aceleiași mărimi, în aceleași condiții. Ele se datoresc unor cauze multiple, ca fluctuațiile întâmplătoare ale influențelor mediului exterior sau ale indicațiilor aparatelor de măsurat, lipsei de atenție a experimentatorului etc.

Erorile întâmplătoare se manifestă prin indicații diferite ale aparatului la măsurarea repetată a aceleiași mărimi.

c) **Greșelile** sînt erori mari, care denaturează mult rezultatele măsurărilor și care se datoresc alegerii greșite a metodei de măsurare, montajului incorect, manipulării greșite, erorilor de citire și de scriere a indicațiilor aparatelor, calculelor inexacte etc.

Rezultatele denaturate datorită greșelilor nu se iau în considerare și trebuie repetată măsurarea.

2. CALCULUL ERORILOR DE MĂSURARE

Pentru aflarea unei valori a mărimii de măsurat cît mai apropiată de valoarea adevărată, după efectuarea măsurărilor se face corectarea rezultatelor obținute, calculîndu-se în acest scop erorile.

Calculul erorilor diferă în funcție de metoda de măsurare folosită.

Într-o măsurare indirectă, mărimea de măsurat A este legată de mărimile măsurate direct $a, b, c...$ cu ajutorul cărora se determină valoarea sa, printr-o relație funcțională (dată de legile electricității):

$$A = f(a, b, c). \quad (1-6)$$

Gradul de precizie al măsurării este definit de *eroarea relativă maximă posibilă* $\pm \frac{\Delta A}{A}$, care se exprimă în funcție de erorile relative $\pm \frac{\Delta a}{a}$, $\pm \frac{\Delta b}{b}$, $\pm \frac{\Delta c}{c} ...$ ale mărimilor măsurate direct $a, b, c...$. Deoarece cel mai adeseori erorile relative parțiale se cunosc numai în mărime, nu și ca semn, pentru

a lua în considerație cazul cel mai defavorabil căruia îi corespunde eroarea relativă maximă, se consideră arbitrar că toate erorile sînt în același sens, și anume pozitiv.

În general, în măsurările executate corect, valorile mărimilor a , b , $c...$ sînt destul de apropiate de valorile lor adevărate, astfel că erorile respective se pot considera ca variații finite, foarte mici, ale variabilelor cărora le corespund variații finite și foarte mici ale funcției, presupusă continuă în domeniul de măsurare, fapt realizat în practică. Determinarea erorii în acest caz se bazează pe formarea diferenței finite, dar foarte mică — *diferențiere simplă* — sau pe formarea diferențialei — *diferențiere logaritmică* — a funcției.

Prin **metoda de diferențiere simplă** calculul erorii se poate efectua în modul următor:

Considerînd că mărimea de determinat se calculează cu o relație de forma:

$$A = a + b + c, \quad (1-7)$$

în care a , b și c sînt mărimile măsurate, se poate scrie:

$$A + \Delta A = (a + \Delta a) + (b + \Delta b) + (c + \Delta c), \quad (1-8)$$

unde: ΔA este eroarea de măsurare a mării de determinat;

Δa , Δb și Δc — erorile la măsurarea mărimilor a , b și c .

Dacă se scade prima ecuație din cea de-a doua:

$$(A + \Delta A) - A = [(a + \Delta a) + (b + \Delta b) + (c + \Delta c)] - (a + b + c),$$

se obține:

$$\Delta A = \Delta a + \Delta b + \Delta c. \quad (1-9)$$

Împărțind apoi această relație cu $A = a + b + c$, se obține eroarea relativă:

$$\Delta_{rA} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a + \Delta b + \Delta c}{a + b + c}. \quad (1-10)$$

Prin **metoda de diferențiere logaritmică** calculul erorii se efectuează astfel:

Presupunînd că mărimile de determinat se calculează cu o relație de forma:

$$A = \frac{a^m b^n}{c^p}, \quad (1-11)$$

în care: a , b și c sînt mărimile măsurate, iar m , n și p exponenții acestor valori (care pot fi întregi sau fracționari, pozitivi sau negativi), dacă se aplică logaritmi ambilor membri ai ecuației, se obține:

$$\ln A = m \ln a + n \ln b - p \ln c. \quad (1-12)$$

Diferențiind relația obținută, rezultă:

$$\frac{dA}{A} = m \frac{da}{a} + n \frac{db}{b} - p \frac{dc}{c}. \quad (1-13)$$

Înlocuindu-se diferențialele dA , da , db și dc prin creșterile finite foarte mici ΔA , Δa , Δb și Δc , se obține:

$$\frac{\Delta A}{A} = m \frac{\Delta a}{a} + n \frac{\Delta b}{b} - p \frac{\Delta c}{c}. \quad (1-14)$$

Valorile ΔA , Δa , Δb și Δc pot fi considerate ca erori de măsurare, iar $\frac{\Delta A}{A}$, $\frac{\Delta a}{a}$, $\frac{\Delta b}{b}$ și $\frac{\Delta c}{c}$ ca erori relative ale determinărilor mărimilor A , a , b și c . În acest caz, considerând și erorile de același semn, ecuația precedentă poate fi scrisă astfel:

$$\Delta_{rA} = m\Delta_{ra} + n\Delta_{rb} + p\Delta_{rc}. \quad (1-15)$$

Deci, dacă se cunosc erorile relative ale fiecărei mărimi măsurate, se poate afla eroarea relativă maximă posibilă a mărimii determinate indirect.

Capitolul II

CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONAREA APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

A. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Aparatele de măsurat electrice sînt mijloacele de măsurare care permit determinarea cantitativă a mărimii de măsurat prin transformarea acesteia într-o mărime perceptibilă prin intermediul unei mărimi electrice.

Orice aparat de măsurat electric se compune dintr-un traductor și un dispozitiv de măsurat (fig. 2—1). *Traductorul* are rolul de a transforma mărimea de măsurat X în mărimea electrică intermediară Y , care de obicei este curentul sau tensiunea electrică. *Dispozitivul de măsurat* este partea activă a aparatului asupra căreia acționează mărimea electrică intermediară, dînd naștere mărimii perceptibile, cu ajutorul căreia se determină valoarea mărimii măsurate. Mărimea perceptibilă poate fi deplasarea α , lineară sau unghiulară, a unui sistem mecanic mobil sau un semnal codificat, de obicei electric, exprimat sub formă cifrică (un număr).

Între deplasarea sistemului mobil sau semnalul codificat, respectiv indicația cifrică, și mărimea de măsurat trebuie să existe o anumită relație bine definită. Această relație este determinată, pe de o parte, de dependența deplasării sau a semnalului codificat (adică a indicației cifice) de mărimea intermediară:

$$\alpha = f_1(Y), \quad (2-1)$$

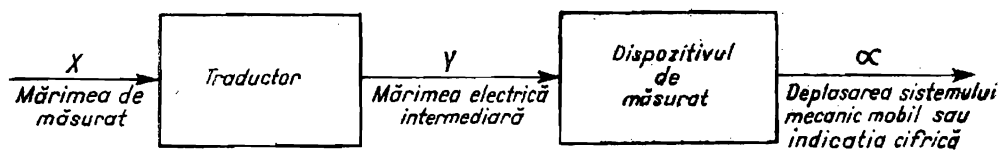


Fig. 2—1. Schema funcțională generală a aparatelor de măsurat electrice.

iar, pe de altă parte, de dependența mărimii intermediare Y de mărimea de măsurat X :

$$Y = f_2(X). \quad (2-2)$$

Prima relație se referă la dispozitivul de măsurat și se determină numai prin proprietățile și parametrii acestuia; cea de-a doua relație se referă la traductor și se determină numai prin proprietățile și parametrii săi.

Eliminând din cele două ecuații mărimea intermediară Y , se obține legătura dintre mărimea de măsurat X și deplasarea sau indicația cifrică α :

$$\alpha = f_1[f_2(X)] = f_3(X). \quad (2-3)$$

Fiecărei valori a mărimii de măsurat X , în anumite condiții exterioare, trebuie să-i corespundă o singură deplasare sau indicație cifrică, bine determinată α . În caz contrar, indicațiile aparatului sînt greșite. Pentru aceasta este necesar ca ambele funcții să fie uniforme, ca variația parametrilor traductorului și ai dispozitivului de măsurat, produsă de variația diferiților factori externi (temperatura, umiditatea sau presiunea mediului înconjurător, cîmpuri magnetice și electrice exterioare, frecvența mărimii de măsurat etc.), să ducă la variații ale indicațiilor aparatului pe cît posibil mai mici, adică să dea erori mici.

B. CLASIFICAREA APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Aparatele de măsurat electrice sînt de construcție foarte diferită, marea lor varietate fiind determinată de diversitatea metodelor de măsurare și de principiile constructive utilizate. Aceste două elemente constituie principalele criterii care stau la baza clasificării aparatelor de măsurat electrice.

— **După metodele de măsurare**, aparatele de măsurat electrice se împart în două grupe:

— *aparate cu citire directă sau indicatoare*, care indică valoarea mărimii măsurate direct pe scara gradată cu ajutorul unui indicator;

— *aparate comparatoare*, care determină mărimea de măsurat prin compararea ei directă cu una sau mai multe măsuri.

— **După principiul de funcționare**, aparatele de măsurat electrice se împart în următoarele grupe determinate de natura fenomenului fizic care stă la baza funcționării aparatului:

— *aparate magnetoelectrice*, care folosesc interacțiunea dintre cîmpul unui magnet permanent și una sau mai multe bobine parcurse de curenți continui; după cum este mobilă bobina sau magnetul permanent, aceste aparate se subîmpart în *aparate cu cadru mobil* și *aparate cu magnet mobil*;

— *aparate feromagnetice* (cu fier mobil), care conțin o piesă mobilă din fier supusă acțiunii unei bobine fixe parcursă de curent sau a unei piese fixe din fier magnetizat de curent;

— *aparate electrodinamice*, care folosesc acțiunea forțelor electrodinamice care se exercită între bobinele fixe și mobile parcurse de curenți;

— *aparate ferodinamice*, care funcțional sînt asemănătoare cu cele electrodinamice, acțiunile electrodinamice fiind sporite prin folosirea de piese feromagnetice așezate în calea liniilor de cîmp magnetic;

— *aparate de inducție*, care folosesc interacțiunea dintre cîmpurile magnetice produse de una sau mai multe bobine fixe parcurse de curenți alternativi și curenții induși de aceștia în piese conductoare mobile;

— *aparate electrostatice*, care funcționează sub acțiunea forțelor electrostatice care se exercită între piese metalice fixe și mobile între care există o diferență de potențial electric;

— *aparate termice cu fir cald*, a căror funcționare se bazează pe dilatarea firelor încălzite de curentul de măsurat;

— *aparate bimetalice*, în care se folosește deformarea unei lame din bi-metal datorită încălzirii sale directe sau indirecte de către curentul de măsurat;

— *aparate cu termocuplu*, în care se măsoară cu ajutorul unui aparat magnetoelectric forța electromotoare a unui termocuplu încălzit de curentul de măsurat;

— *aparate cu redresor*, care sînt formate dintr-un aparat de măsurat magnetoelectric asociat cu un dispozitiv redresor, cu ajutorul căruia se măsoară curenți sau tensiuni alternative;

— *aparate cu lame vibrante*, a căror funcționare se bazează pe acțiunea unui electromagnet de curent alternativ, combinat sau necombinat cu un magnet, asupra unor lamele metalice care intră în rezonanță.

Alte criterii de clasificare. În afară de cele două criterii de clasificare arătate, aparatele de măsurat electrice se mai clasifică și **după precizia cu care măsoară** (clasele de precizie 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5) **după natura mărimii măsurate** (ampermetre, voltmetre, wattmetre etc.), **după utilizare** (aparate de laborator în clasa 0,1 ÷ 0,5, tehnice în clasa 1 ÷ 5, sau de tablou în clasa 0,5 ÷ 5) etc.

C. CARACTERISTICILE DE FUNCȚIONARE ALE APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Funcționarea aparatelor de măsurat electrice se bazează pe utilizarea fenomenelor fizice legate de trecerea curentului electric sau de formarea cîmpului electromagnetic, care produc după legi cunoscute efecte măsurabile sub formă de forțe sau cupluri mecanice sau anumite stări ale elementelor electronice sau magnetice. Sub acțiunea acestora, folosind energia cîmpului magnetic sau electric sau a curentului electric, se obține mărimea perceptibilă care este deplasarea unui sistem mecanic mobil sau un semnal cifric. La cele mai multe dintre aparatele indicatoare (aparate magnetoelectrice,

feromagnetice, electrodinamice, electrostatice și de inducție), energia câmpului magnetic sau electric se transformă direct în energie mecanică. Deplasările sistemului mobil ale acestor aparate sînt de obicei unghiulare, acesta rotindu-se sub acțiunea unui cuplu de forțe denumit *cuplu activ* M_a .

Cuplul activ M_a ia naștere în dispozitivele de măsurat datorită proprietății generale a corpurilor mobile, care găsindu-se într-un câmp electromagnetic sau electrostatic, prin mișcarea lor produc o variație a energiei câmpului tind să se așeze astfel încît energia sistemului să fie cît mai mare. Această tendință de mărire a energiei determină apariția cuplului activ care acționează asupra sistemului mobil. În baza acestei proprietăți, expresia generală a cuplului activ este dată de derivata energiei câmpului magnetic sau electric W_m în raport cu deviația α a sistemului mobil, luată ca variabilă independentă:

$$M_a = \frac{dW_m}{d\alpha}. \quad (2-4)$$

Valoarea și forma energiei câmpului magnetic sau electric depind atît de principiul de funcționare al aparatului cît și de valoarea mărimii intermediare Y și deci a mărimii de măsurat X . De aici rezultă că fiecărei valori a mărimii de măsurat îi corespunde pentru aparatul dat o valoare complet determinată a cuplului activ, adică:

$$M_a = f(X). \quad (2-5)$$

Dacă asupra sistemului mobil al dispozitivului de măsurat ar acționa numai cuplul activ, acesta s-ar deplasa pînă la limita extremă, indiferent de valoarea mărimii de măsurat. Pentru ca fiecărei valori a mărimii de măsurat să-i corespundă o anumită deplasare, cuplul activ este echilibrat cu un cuplu de sens contrar, proporțional cu unghiul de rotație α a sistemului mobil, denumit *cuplu rezistent* M_r :

$$M_r = K\alpha, \quad (2-6)$$

unde: K este o constantă de proporționalitate.

Cuplul rezistent poate fi creat pe cale mecanică cu ajutorul unor elemente elastice, pe cale magnetică sau electrică.

Așadar sistemul mobil se rotește sub acțiunea simultană a cuplului activ și a cuplului rezistent pînă cînd acesta din urmă, crescînd cu unghiul de rotire, egalează cuplul activ. Unghiul de rotire pentru care se obține echilibrul se numește *deviație permanentă*. Poziția de echilibru se caracterizează deci prin aceea că suma cuplurilor care acționează asupra sistemului mobil este nulă. Dacă se neglijează într-o primă aproximație cuplul de frecări, această condiție se scrie:

$$M_a - M_r = 0. \quad (2-7)$$

Înlocuind în această relație cele două cupluri cu expresiile lor (2-5) și (2-6), se obține:

$$f(X) - K\alpha = 0,$$

de unde:

$$\alpha = \frac{1}{K} f(X) = f_1(X). \quad (2-8)$$

Această funcție exprimă dependența deviației α a sistemului mobil de mărimea de măsurat X și se numește *caracteristica scării* aparatului de măsurat, deoarece ea determină precis așezarea relativă a reperelor pe scară.

La aparatele la care sistemul mobil se reazemă pe lagăre apar frecări, care dau naștere unui *cuplu de frecare*, orientat în sens opus rotirii. Ca efect al acestui cuplu sistemul mobil se stabilește la poziția de echilibru ceva mai înainte decât în cazul lipsei frecării. Valoarea cuplului de frecări M_f , stabilită experimental este determinată de greutatea G a sistemului mobil și de materialul și starea suprafeței lagărelor și pivoților:

$$M_f = cG^{1,5}, \quad (2-9)$$

unde c este o constantă de proporționalitate.

D. CARACTERISTICILE METROLOGICE ALE APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Caracteristicile metrologice ale unui aparat de măsurat sînt proprietățile care determină calitățile acestuia. Aceste proprietăți depind de condițiile în care se găsește aparatul sau se efectuează măsurarea, fiind influențate de factorii externi (temperatură, umiditate, cîmpuri magnetice și electrice, poziția aparatului, deformația remanentă a elementelor elastice care dau cuplul rezistent etc.). Cu cît influența acestor factori este mai mică cu atît aparatul are caracteristici metrologice mai bune.

Caracteristicile metrologice ale aparatelor de măsurat electrice sînt:

- a) **Precizia** este caracteristica metrologică a unui aparat de măsurat prin care se exprimă gradul de exactitate a rezultatelor în măsurări.
- b) **Fidelitatea** este caracteristica metrologică a unui aparat de măsurat de a avea o variație cît mai mică la diferite măsurări ale aceleiași mărimi. Fidelitatea este determinată de erorile întîmplătoare ale aparatelor, fiind cu atît mai mare cu cît aceste erori sînt mai mici.
- c) **Justețea** este caracteristica metrologică a unui aparat de măsurat de a da indicații x_i apropiate de valoarea efectivă X_e a mărimii măsurate. Justețea este determinată de eroarea de indicație a aparatului de măsurat, fiind cu atît mai mare cu cît această eroare este mai mică.
- d) **Sensibilitatea** este caracteristica metrologică a unui aparat de măsurat de a percepe cele mai mici variații ale mărimii de măsurat. Se exprimă

prin raportul dintre creșterea $\Delta\alpha$ a unghiului de deviație a sistemului mobil și creșterea ΔX a mărimii de măsurat:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X}. \quad (2-10)$$

Pentru aceeași creștere a mărimii de măsurat, cu cît este mai mare creșterea unghiului de deviație a sistemului mobil cu atît aparatul este mai sensibil.

e) **Mobilitatea** este caracteristica metrologică a unui aparat de măsurat de a avea o inerție cît mai mică, urmărind cît mai rapid variațiile mărimii de măsurat. Se exprimă prin raportul dintre variația mărimii de măsurat și timpul necesar dispozitivului de măsurat de a realiza variația respectivă a deviației sistemului mobil.

f) **Consumul propriu al aparatelor de măsurat** reprezintă consumul de energie electrică necesar funcționării aparatului. Această energie se consumă, pe de o parte, ca energie mecanică pentru acționarea dispozitivului de măsurat, iar, pe de altă parte, ca pierderi prin încălzirea circuitelor electrice. Energia consumată este luată în întregime de la sursa care a produs fenomenul sau poate fi împrumutată în parte de la o sursă auxiliară. Din această cauză consumul propriu al aparatelor de măsurat trebuie să fie cît mai mic, astfel încît la conectarea lor în circuitul de măsurare să nu se influențeze valoarea mărimii de măsurat și regimul de lucru al circuitului, adică să nu se introducă erori de măsurare.

g) **Capacitatea de supraîncărcare** este proprietatea aparatului de a suporta, fără deteriorări sau erori suplimentare, sarcini mai mari decît cea nominală, care să producă supraîncălziri de lungă durată — *capacitate de supraîncărcare termică* — sau șocuri mecanice de scurtă durată (datorite unor supraîncărcări bruște) — *capacitate de supraîncărcare dinamică*.

h) **Robustețea** este calitatea aparatelor de măsurat de a rezista diverselor șocuri și trepidatii mecanice, fără a se deteriora sau a introduce erori suplimentare. Robustețea aparatelor este determinată, în general, de suspensia sistemului mobil.

Un aparat de măsurat electric are o precizie cu atît mai mare cu cît este mai fidel, mai just, mai sensibil, mai mobil și mai robust, cu cît consumul propriu de putere este mai mic și capacitatea de supraîncărcare mai mare.

E. PĂRȚILE COMPONENTE ALE APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Deși sînt de o mare diversitate din punctul de vedere al construcției și principiului de funcționare, aparatele de măsurat electrice au o serie de elemente componente comune, care diferă între ele numai constructiv în funcție de tipul aparatului, destinația lui și condițiile de exploatare.

Orice aparat de măsurat electric se compune din dispozitivul de măsurat, traductorul și diferite accesorii.

1. DISPOZITIVUL DE MĂSURAT

Acesta este format din ansamblul organelor din a căror interacțiune apar forțe mecanice care determină mișcarea sistemului mobil. Constructiv, dispozitivul de măsurat diferă de la un tip de aparat la altul după principiul de funcționare. În toate cazurile însă el se compune dintr-o parte fixă și una mobilă — sistemul mobil — ale cărei deplasări, liniare sau unghiulare, reprezintă valoarea mărimii măsurate.

a). **Partea fixă a dispozitivului de măsurat** produce câmpul magnetic sau electric ce provoacă mișcarea sistemului mobil. Ea poate fi alcătuită din unul sau mai mulți magneți permanenți (la aparatele magnetoelectrice), din una sau mai multe bobine (la aparatele feromagnetice, electrodinamice și ferodinamice), un sistem de electromagneți (la aparatele de inducție), un sistem de plăci conductoare (la aparatele electrostatice), conductoare de curent (la aparatele termice cu fir cald).

b) **Sistemul mobil** produce un câmp de aceeași natură cu cel produs de partea fixă, cu care interacționează și dă naștere forțelor sau cuplului mecanic. Sistemul mobil poate fi constituit din bobine mobile în formă de cadru (la aparatele magnetoelectrice, electrodinamice și ferodinamice), plăci metalice (la aparatele feromagnetice și electrostatice), discuri nemagnetice (la aparatele de inducție) sau pîrghii mobile (la aparatele termice cu fir cald). Sistemul mobil este fixat pe un ax care se sprijină în lagăre (fig. 2-3) sau este suspendat pe benzi tensionate (fig. 2-2,a) sau pe fir de torsiune (fig. 2-2,b).

Suspensia pe lagăre este cea mai utilizată (în special în aparatele de tablou), suspensia pe benzi tensionate sau pe fir de torsiune fiind folosită numai la aparatele de mare sensibilitate.

În afara acestor elemente active, dispozitivul de măsurat posedă și o serie de elemente auxiliare, ca:

c) **Dispozitivul de producere a cuplului rezistent** se opune și echilibrează forțele sau cuplul mecanic care apar între elementele active ale dispozitivului de măsurat. Cuplul rezistent al aparatelor de măsurat electrice poate fi realizat pe cale mecanică, electrică sau magnetică.

Cuplul rezistent mecanic este creat în majoritatea aparatelor de arcuiri spirale (fig. 2-3), iar la aparatele cu sistemul mobil suspendat pe benzi sau fire de torsiune chiar de benzile sau firele de suspensie prin răsucirea sau dezrăsucirea lor o dată cu rotirea sistemului mobil.

Dacă deformările sînt mici, sub limita de elasticitate a materialului, cuplul rezistent mecanic este proporțional cu unghiul de rotație α a sistemului mobil:

$$M_r = D\alpha, \quad (2-11)$$

unde D este o constantă constructivă a elementului elastic denumită *cuplu rezistent specific*.

Arcurile spirale sînt fixate cu un capăt de axul sistemului mobil, iar cu celălalt capăt de șasiul dispozitivului de măsurat sau de o piesă mobilă, numită *corector* (fig. 2-3), care servește la reglarea poziției de zero a dispozitivului de citire al aparatului. Corectorul constă dintr-un șurub prevăzut cu

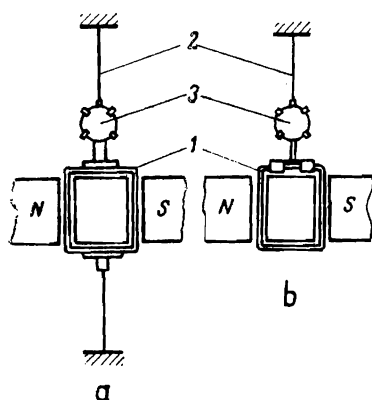


Fig. 2—2. Suspensia sistemului mobil pe benzile tensionate și pe fir de torsiune:

1 — cadrul mobil; 2 — banda tensionată sau firul de torsiune; 3 — oglindă.

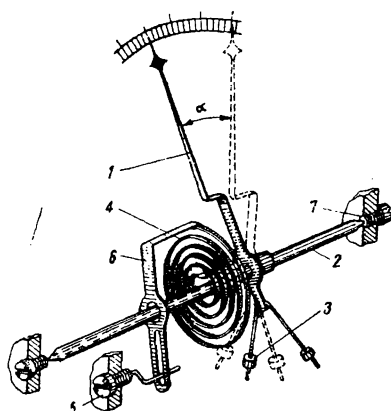


Fig. 2—3. Dispozitivul de producere a cuplului rezistent; corectorul și dispozitivul de citire al unui aparat indicator:

1 — acul indicator; 2 — axul sistemului mobil; 3 — contragreutățile; 4 — arcul spiral; 5 — corectorul; 6 — antrenorul corectorului; 7 — lagărul.

o tijă excentrică față de axa sa de rotație, care poate deplasa prin intermediul unui antrenor punctul de fixare a unuia dintre arcurile spirale.

Arcurile spirale ca și benzile și firele de suspensie servesc și la revenirea sistemului mobil la zero după efectuarea măsurării, iar la unele aparate, la aducerea curentului la bobina mobilă.

La anumite aparate, denumite logometre, cuplul rezistent este produs în același mod ca și cuplul activ de forțe electromagnetice. Sistemul mobil al acestor aparate este prevăzut cu două bobine încrucișate sub un anumit unghi, fixate pe același ax, asupra cărora acționează cupluri dirijate în sensuri contrare, dintre care unul este cuplul activ, iar celălalt cuplul rezistent.

Cuplul rezistent magnetic este creat de interacțiunea dintre curenții induși de un magnet permanent într-un disc de aluminiu care se rotește între polii săi și cîmpul magnetului.

d) **Dispozitivul de citire** indică valoarea mărimii măsurate cu ajutorul unui *indicator* (solidar cu sistemul mobil al dispozitivului de măsurat), care se mișcă în fața unui *cadran* pe care este trasată *scara gradată*, alcătuită dintr-un număr de repere dispuse de-a lungul unei linii drepte sau curbe corespunzînd unui șir de valori ale mărimii de măsurat.

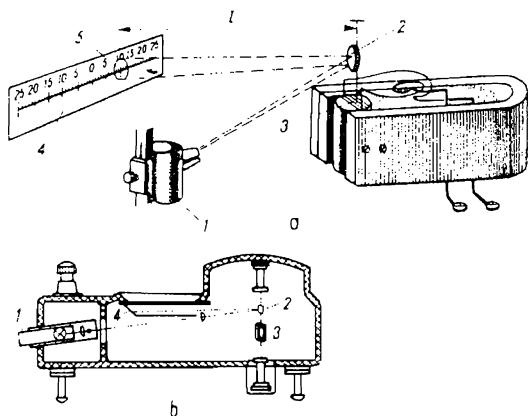
Scările pot fi gradate uniform sau neuniform, după cum intervalele dintre repere (diviziunile) sînt egale sau nu între ele.

Cadranele au de obicei scara gradată corespunzătoare unui unghi maxim de deviație a sistemului mobil, în jurul a 90° .

Indicatorul, în general, este un ac rigid de aluminiu, cu vîrfurile în formă de săgeată sau cuțit, fixat pe axul sistemului mobil și echilibrat cu două contragreutăți plasate în partea opusă (fig. 2-3). La aparatele de mare

Fig. 2—4. Indicator cu spot luminos:

1 — sursă de lumină; 2 — oglindă; 3 — sistemul mobil; 4 — rigla (cadrantul) gradată;
5 — spotul luminos cu reticul.



sensibilitate se folosesc indicatoare cu spot luminos. Acestea constau dintr-o mică oglindă fixată pe sistemul mobil, care reflectă o rază de lumină primită de la o sursă aflată în interiorul sau în afara aparatului, trimițând-o pe o riglă gradată exterioară (fig. 2-4,a) sau pe un cadran interior (fig. 2-4,b) sub forma unui spot luminos.

e) **Amortizorul** temperează mișcarea indicatorului la stabilirea sa la poziția de echilibru (pentru a evita oscilațiile). Ca dispozitive de amortizare se folosesc de obicei amortizoare cu aer și amortizoare magnetice.

Amortizoarele cu aer sînt alcătuite dintr-un tub 1, de o formă oarecare, închis la capete, în interiorul căruia se mișcă o paletă (fig. 2-5,a) sau un piston 2 (fig. 2-5,b), solidar legate cu axul 3 al sistemului mobil. Prin rezistența pe care aerul o opune mișcării paletei se amortizează oscilațiile sistemului mobil.

Amortizoarele magnetice (fig. 2-5,c) sînt alcătuite dintr-un disc 1 (sau numai un sector de disc) din material nemagnetic, fixat pe axul 2 al sistemului mobil, care se mișcă între polii unui magnet permanent 3. Datorită interacțiunii dintre curenții turbionari ce iau naștere în disc, la mișcarea acestuia în câmpul magnetului permanent și fluxul magnetic al acestuia,

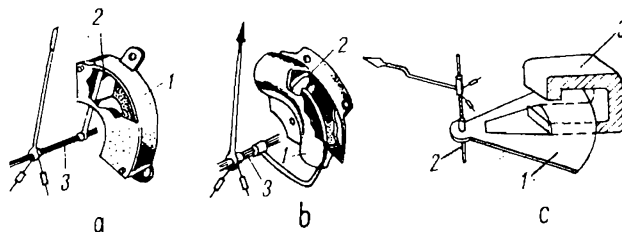


Fig. 2—5. Amortizoare.

se produce un cuplu care se opune mișcării discului. Se obține astfel frînarea discului și amortizarea rapidă a oscilațiilor sistemului mobil.

Potrivit normelor, timpul de amortizare a oscilațiilor sistemului mobil nu trebuie să depășească 4 s.

2. TRADUCTORUL

Traductorul este format din ansamblul elementelor care transformă mărimea de măsurat în curent sau tensiune electrică.

Traductorul transformă în curent sau tensiune atât mărimi electrice (rezistență, inductanță, capacitate, putere, energie, frecvență etc.) cât și mărimi magnetice (flux, câmp, inducție, pierderi magnetice etc.) sau neelectrice (temperatură, forță, presiune, deplasare, viteză etc.).

Elementele traductorului diferă în funcție de natura mărimii de măsurat. Ele constau din șunturi, rezistențe adiționale, inductanțe, capacități, bobine, transformatoare de măsurat, redresoare, amplificatoare, elemente termoelectrice, fotoelectrice sau pizelectrice etc. Dintre acestea, cele mai des întâlnite sînt șunturile și rezistențele adiționale.

a) **Șunturile** sînt rezistențe care se montează în paralel cu dispozitivele de măsurat (fig. 2-6) în scopul măsurării unui curent mai mare cu un dispozitiv de măsurat construit pentru un curent mai mic, deci pentru extinderea limitei de măsurare a acestuia. Pentru o extindere de n ori a limitei de măsurare, rezistența R_s a șuntului se determină în funcție de rezistența interioară R_a a dispozitivului de măsurat cu relația:

$$R_s = \frac{R_a}{n - 1}, \quad (2-12)$$

unde $n = \frac{I}{I_a}$ este coeficientul de șantare, adică raportul dintre curentul de măsurat I și curentul I_a prin dispozitivul de măsurat.

Șunturile pot fi cu o singură limită de măsurare (fig. 2-6,a) sau cu mai multe (fig. 2-6,b). Acestea din urmă sînt alcătuite din mai multe rezistențe

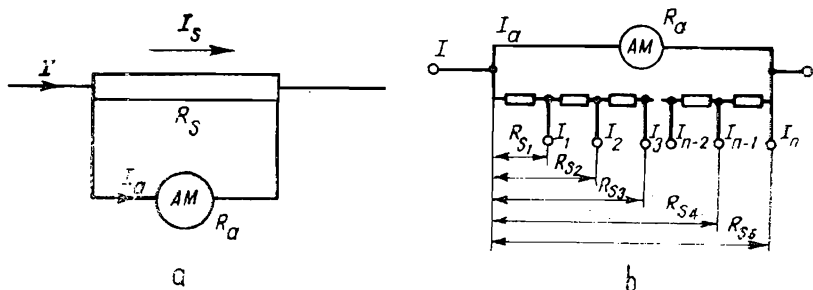


Fig. 2—6. Schema șanturilor.

legate în serie (prevăzute fiecare cu câte o bornă de ieșire), ansamblul lor fiind conectat în paralel la bornele dispozitivului de măsurat.

Șunturile se construiesc din benzi sau bare de manganină și sînt prevăzute cu două perechi de borne: una pentru conectarea dispozitivului de măsurat și a doua (cea exterioară) pentru legarea în circuitul de măsurare.

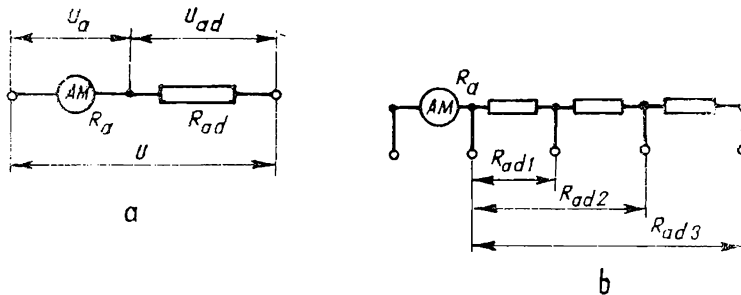


Fig. 2—7. Schema rezistențelor adiționale:

a — cu o singură limită de măsurare; b — cu mai multe limite de măsurare.

Șunturile pot fi montate în interiorul aparatelor (pentru curenți de la câteva zeci de miliamperi pînă la câteva zeci de amperi) sau în exterior, sub forma unor piese separate (pentru curenți de la cîțiva amperi pînă la mii de amperi). Pentru a se evita erorile, șunturile nu trebuie să se încălzească.

b) **Rezistențele adiționale** sînt rezistențe care se montează în serie cu dispozitivele de măsurat (fig. 2-7) în scopul de a se putea măsura o tensiune mai mare decît tensiunea maximă a dispozitivului de măsurat. În acest mod tensiunea de măsurat U se împarte în tensiunea U_a aplicată la bornele dispozitivului de măsurat și tensiunea U_{ad} la bornele rezistenței adiționale. Pentru o extindere de n ori a limitei de măsurare a dispozitivului de măsurat, rezistența adițională R_{ad} se determină în funcție de rezistența interioară R_a a dispozitivului de măsurat cu relația:

$$R_{ad} = R_a (n - 1), \quad (2-13)$$

în care $n = \frac{U}{U_a}$ este coeficientul de multiplicare, adică raportul dintre tensiunea U de măsurat și tensiunea U_a la bornele dispozitivului de măsurat.

La fel ca și șunturile, rezistențele adiționale pot fi cu una sau mai multe limite de măsurare, interioare (pentru tensiuni pînă la 600 V) sau exterioare aparatului (pentru tensiuni peste 600 V).

Rezistențele adiționale se execută din sîrmă de manganin izolată, înfășurată pe plăci izolate de preșpan, ardezic sau role de porțelan.

3. ACCESORIILE

Accesoriile servesc la apărarea dispozitivului de măsurat împotriva acțiunilor exterioare, la fixarea și consolidarea dispozitivului de măsurat, la legarea acestuia în circuitul de măsurare etc. Dintre acestea cel mai important rol îl are *cutia* aparatului în care este adăpostit dispozitivul de măsurat și uneori și traductorul (șunturi, rezistențe adiționale etc.).

F. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT MAGNETOELECTRICE

În dispozitivele de măsurat magnetoelectrice pentru deplasarea sistemului mobil se folosește energia câmpului magnetic a ansamblului format dintr-unul sau mai mulți magneți permanenți și unul sau mai multe circuite parcurse de curenții de măsurat.

După construcția lor, dispozitivele de măsurat magnetoelectrice pot fi cu magnet fix și bobină mobilă sau cu bobină fixă și magnet mobil.

În figura 2-8 este reprezentată construcția unui dispozitiv de măsurat cu magnet fix și bobină mobilă. Acesta constă dintr-un circuit magnetic alcătuit dintr-un magnet permanent 1 în formă de potcoavă, la capetele căruia sînt fixate două piese polare 2 cu deschidere cilindrică care cuprind între ele un miez cilindric fix 3, și o bobină mobilă 4 ce se poate roti liber în jurul miezului cilindric în câmpul magnetic radial și uniform din întrefierul circuitului magnetic. Bobina mobilă, constituită din înfășurarea unui conductor subțire (de diametru 0,02 — 0,2 mm) de cupru sau aluminiu izolat pe un cadru ușor de aluminiu, este montată pe două semiaxe a căror capete se reazemă în lagăre. De semiaxe sînt prinse două arcuiri spirale 5 care creează cuplul rezistent și în același timp servesc la aducerea curenților în bobina mobilă. Capătul fix al unuia din arcuiri este prins la șasiul aparatului, iar al celuilalt la furca corectorului de zero 6. Pe unul din semiaxe este fixat acul indicator 7, al cărui capăt se deplasează în fața scării gradate 8. Acul este echilibrat de contragreutățile 9.

La trecerea unui curent continuu prin bobină, ca urmare a interacțiunii curenților cu câmpul magnetic, asupra părților active ale spirelor bobinei aflate în întrefier acționează forțe F care dau naștere unui cuplu activ M_a care rotește bobina (fig. 2-9).

Expresia cuplului activ este dată conform ecuației generale (2-4) a cuplului activ de derivata energiei câmpului magnetic W_m în raport cu deviația α a sistemului mobil. În acest caz, energia câmpului provenită din acțiunea forțelor electromagnetice dintre fluxul Φ al magnetului permanent care străbate bobina și curentul I din aceasta este:

$$W_m = \Phi I. \quad (2-14)$$

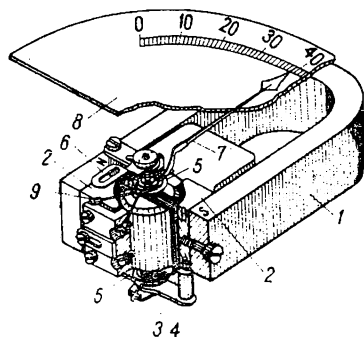


Fig. 2—8. Dispozitivul de măsurat magnetoelectric.

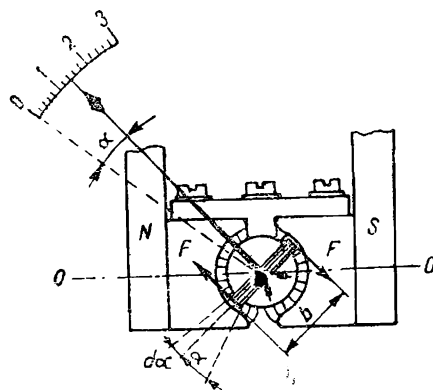


Fig. 2—9. Schema dispozitivului de măsurat magnetoelectric.

La rotirea bobinei cu un unghi $d\alpha$, energia cîmpului magnetic se modifică datorită variației fluxului Φ al magnetului permanent care străbate cadrul:

$$dW_m = I d\Phi. \quad (2-15)$$

Cîmpul magnetic în întrefier fiind radial și uniform, variația fluxului $d\Phi$ este:

$$d\Phi = Bbln d\alpha = BSn d\alpha, \quad (2-16)$$

unde: B este inducția magnetică în întrefier; b — lățimea bobinei; l — lungimea părții active a spirelor bobinei; $S = bl$ — suprafața activă a bobinei; n — numărul de spire al bobinei. Introducînd această expresie în ecuația generală a cuplului activ, se obține:

$$M_a = \frac{dW_m}{d\alpha} = I \frac{d\Phi}{d\alpha} = IBSn = I\Phi_0, \quad (2-17)$$

unde $\Phi_0 = BSn$ reprezintă fluxul magnetic care străbate cadrul la o rotire a acestuia cu un unghi α egal cu unitatea (1 radian).

Bobina mobilă se rotește pînă cînd cuplul rezistent dat de arcurile spirale ($M_r = D\alpha$) egalează cuplul activ ($M_r = M_a$). Din egalitatea expresiilor celor două cupluri rezultă ecuația scării:

$$\alpha = \frac{BSn}{D} I = S_I I, \quad (2-18)$$

unde:

$$S_I = \frac{\alpha}{I} = \frac{BSn}{D} \quad (2-19)$$

reprezintă *sensibilitatea dispozitivului față de curent*, adică deviația sistemului mobil pentru un curent egal cu unitatea.

Ecuția scării arată că la dispozitivele de măsurat magnetoelectrice deviația sistemului mobil este proporțională cu curentul de măsurat și deci scara gradată a aparatului este uniformă.

Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice se folosesc numai în curent continuu; în curent alternativ cuplul activ devenind de asemenea alternativ, sistemul mobil nu poate urmări variațiile acestuia din cauza momentului său de inerție relativ mare și astfel deviația sa este determinată de cuplul activ mediu pentru perioada curentului, care pentru curent sinusoidal este egal cu zero.

Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice sînt influențate de temperatură și cîmpurile magnetice exterioare. Influența temperaturii se manifestă prin variația rezistenței bobinei, variația elasticității arcurilor spirale, deci a cuplului rezistent și variația inducției în întrefier, deci a cuplului activ. Cuplul rezistent și cuplul activ variind în aceeași măsură, practic efectele se compensează; importantă este variația rezistenței, pentru a cărei micșorare se utilizează scheme speciale de compensare. Influența cîmpurilor magnetice exterioare este neînsemnată deoarece cîmpul magnetic propriu al dispozitivelor de măsurat magnetoelectrice este foarte intens.

Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice sînt cele mai precise și sensibile dispozitive de măsurat indicatoare, putînd ajunge la clasa de precizie 0,1. Ele au, de asemenea, calitatea de a avea un consum propriu redus (cîtiva mW). Aceste dispozitive au neajunsul că nu funcționează decît în curent continuu și nu suportă supraîncălcări mari, deoarece curentul de măsurat ajungînd la bobina mobilă prin arcurile spirale, provoacă supraîncălzirea acestora ceea ce duce la pierderea elasticității și chiar la ardere.

G. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT FEROMAGNETICE

Funcționarea dispozitivelor de măsurat feromagnetice se bazează pe interacțiunea dintre cîmpul magnetic al unei bobine fixe, parcursă de curentul de măsurat și unul sau mai multe miezuri mobile dintr-un material feromagnetic. Sistemul mobil tinde să se așeze astfel încît să întărească cîmpul magnetic al bobinei sau, cu alte cuvinte, ca energia sistemului să fie maximă.

Din punctul de vedere al interacțiunii elementelor sale dispozitivele de măsurat feromagnetice sînt de două tipuri:

- de atracție, la care sistemul mobil este atras în cîmpul magnetic al bobinei.
- de repulsie, la care sistemul mobil este respins din cîmpul magnetic al bobinei;

Dispozitivele de măsurat feromagnetice de atracție (fig. 2-10, a) sînt constituite dintr-o bobină plată 1 cu o fereastră îngustă în interiorul căreia poate pătrunde miezul 2 din material magnetic moale, fixat excentric pe axul 3. Pe ax sînt fixate, de asemenea, acul indicator 4 cu contragreutățile 5, arcul spiral 6 pentru crearea cuplului rezistent, legat cu celălalt capăt la corectorul de zero 7 și paleta amortizorului 8.

La trecerea curentului prin înfășurarea bobinei, sub acțiunea cîmpului magnetic al acesteia, miezul 2 este atras în interiorul bobinei, pentru ca energia cîmpului să devină maximă.

Dispozitivele de măsurat feromagnetice de repulsie (fig. 2-10, b) sînt compuse dintr-o bobină cilindrică 1 în interiorul căreia se găsesc două piese din oțel magnetic moale, una fixă 2 și una mobilă 3 fixată pe axul 4. Pe ax sînt fixate, de asemenea, acul indicator 5, amortizorul 6 și arcul spiral 7, pentru crearea cuplului rezistent. Bobina este înconjurată de un ecran magnetic din oțel 8.

La trecerea curentului prin bobină, cele două piese se magnetizează în același fel și ca urmare se resping, piesa mobilă împreună cu axul rotindu-se cu un unghi oarecare.

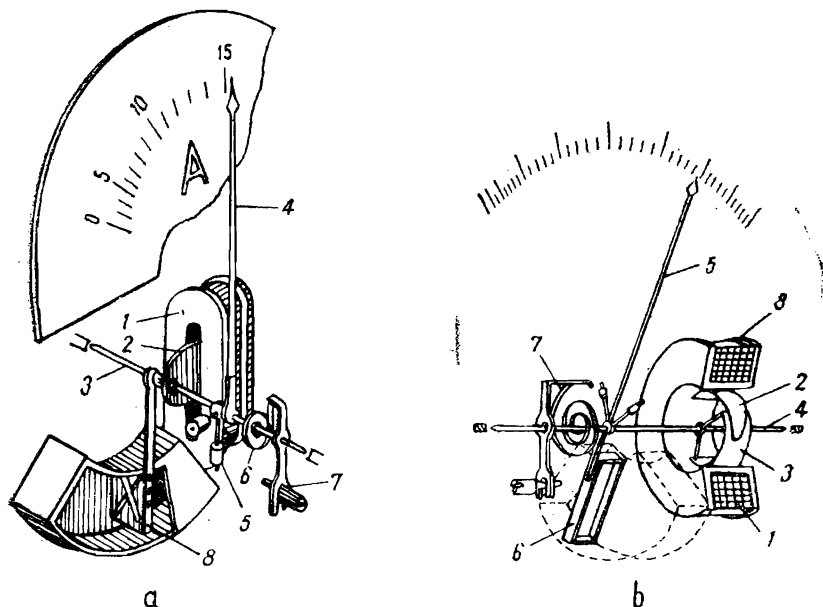


Fig. 2—10. Dispozitivul de măsurat feromagnetic.

Expresia cuplului activ al dispozitivelor de măsurat feromagnetice se deduce folosind ecuația generală (2-4) a cuplului activ. În acest caz, energia cîmpului magnetic al bobinei cu inductanța L , prin care trece curentul I , este:

$$W_m = \frac{1}{2} I^2 L. \quad (2-20)$$

La rotirea sistemului mobil schimbarea energiei cîmpului se datorește numai schimbării inductanței în funcție de unghiul de rotație α (de poziția miezului în interiorul bobinei). Ca urmare expresia cîmpului activ este:

$$M_a = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{1}{2} I^2 L \right) = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (2-21)$$

La echilibrul sistemului mobil, cuplul rezistent dat de arcurile spirale ($M_r = D\alpha$) devenind egal cu cuplul activ ($M_a = M_r$), se deduce ecuația scării:

$$\alpha = \frac{1}{2D} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (2-22)$$

Din această relație rezultă că dacă $\frac{dL}{d\alpha} = \text{constant}$, scara gradată a dispozitivelor de măsurat feromagnetice este pătratică. Se poate obține o uniformizare a scării prin modificarea formei pieselor feromagnetice și a poziției lor inițiale față de bobină, astfel ca factorul $\frac{dL}{d\alpha}$ să capete valori mai mari pentru curenți mici și valori mai mici la curenți mari. Prin aceasta se poate obține o scară gradată aproape uniform, începînd de la 15 la 20% din valoarea limită superioară a mărimii de măsurat.

În curent alternativ, o dată cu schimbarea sensului curentului schimbîndu-se atît direcția fluxului magnetic cît și polaritatea pieselor feromagnetice, cuplul activ acționează tot timpul în același sens. Sistemul mobil avînd o inerție mare deviază sub acțiunea valorii medii a cuplului activ în cursul unei perioade și prin urmare, deviația sistemului mobil este proporțională cu pătratul valorii eficace a mărimii de măsurat.

Rezultă deci că dispozitivele de măsurat feromagnetice pot fi întrebuițate atît în curent continuu cît și în curent alternativ, deviația lor fiind funcție de pătratul curentului care trece prin bobină.

Indicațiile dispozitivelor de măsurat feromagnetice sînt influențate de fenomenul de histerezis și curenții turbionari care intervin în piesele feromagnetice. La funcționarea în curent continuu, datorită fenomenului de histerezis al piesei feromagnetice mobile, aparatele dau indicații diferite (pînă la 3—4% din lungimea scării) la valorile crescătoare și descrescătoare ale curentului. La funcționarea în curent alternativ, datorită curenților turbionari induși în piesele feromagnetice, care au o acțiune demagnetizantă, indicațiile aparatelor sînt ceva mai mici (cu circa 1—2%) decît în curent continuu.

Cîmpurile magnetice exterioare influențează puternic dispozitivele de măsurat feromagnetice deoarece cîmpul magnetic propriu al acestora este redus. Reducerea acestei influențe se realizează prin ecranarea dispozitivelor de măsurat cu învelișuri feromagnetice sau prin construcția astatică a dispozitivului de măsurat. Dispozitivele astatice sînt prevăzute cu două bobine identice conectate în serie, rotite una față de cealaltă cu 180° și ale căror cîmpuri magnetice sînt egale, dar de sens contrar. Bobinele au miezuri

separate identice și fixate pe un ax comun. Cîmpul magnetic exterior nu influențează indicațiile aparatului astatic, deoarece în măsura în care slăbește cîmpul unei bobine în aceeași măsură întărește cîmpul celeilalte și astfel cuplul activ rezistent al aparatului rămîne același.

Calitățile dispozitivelor de măsurat feromagnetice sînt: utilizare în curent continuu și în curent alternativ, rezistență la suprasarcini mari de curent, simplitate și preț de cost scăzut. Neajunsurile acestor dispozitive sînt: scara gradată neuniform, consum propriu mare ($0,5 \div 7,5$ VA), sensibilitate redusă și dependența indicațiilor de cîmpurile magnetice exterioare.

H. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT ELECTRODINAMICE ȘI FERODINAMICE

În dispozitivele de măsurat electrodinamice și ferdinamice pentru deplasarea sistemului mobil se folosește energia cîmpului magnetic a sistemului format din una sau mai multe bobine fixe (care produc cîmpul magnetic) și una sau mai multe bobine mobile (care se mișcă în acest cîmp).

Dispozitivele de măsurat electrodinamice sînt constituite dintr-o bobină fixă cilindrică 1 compusă din două jumătăți identice (legate în serie sau în

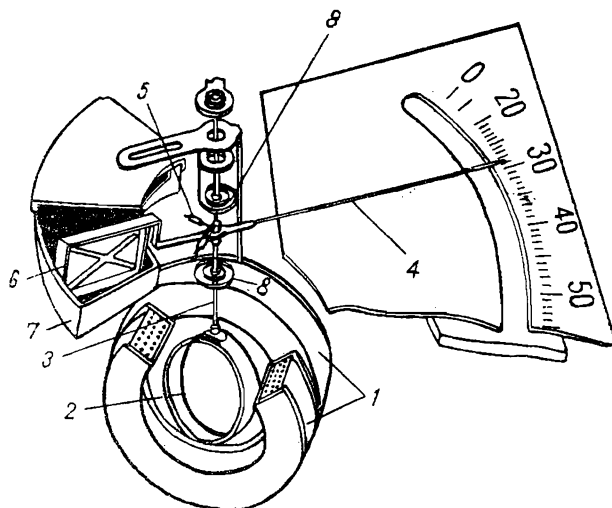


Fig. 2—11. Dispozitivul de măsurat electrodinamic.

paralel) și o bobină mobilă 2 care se mișcă în interiorul bobinei fixe în cîmpul produs de aceasta (fig. 2-11). Bobina mobilă este fixată rigid pe axul 3 al sistemului mobil, de care se mai găsesc prinse acul indicator 4, contragreutățile 5 și paleta 6 a amortizorului 7. Curentul este adus la bobina mo-

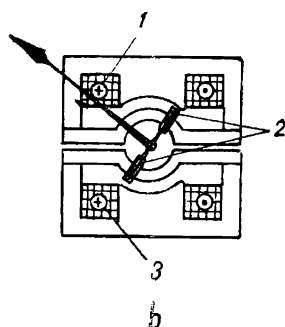
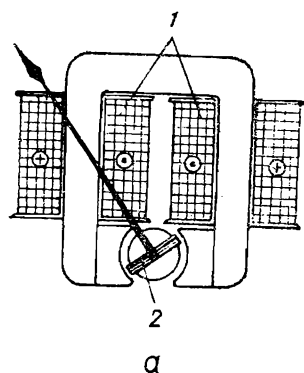


Fig. 2—12. Dispozitivul de măsurat ferodinamic;
1 — bobina fixă; 2 — bobina mobilă;
3 — circuitul magnetic.

bilă prin două arcuri spirale 8, care servesc totodată la crearea cuplului rezistent.

Dispozitivele de măsurat ferodinamice se deosebesc de cele electrodinamice doar prin aceea că au circuitul magnetic al bobinei fixe alcătuit în cea mai mare parte din material feromagnetic, ceea ce permite obținerea unui câmp magnetic puternic și ca urmare a unui cuplu activ mult mai mare.

Construcția dispozitivelor de măsurat ferodinamice (fig. 2-12) amintește în mare măsură dispozitivele magnetoelectrice, în care magnetul permanent este înlocuit printr-un electromagnet. În întrefierul acestor aparate, de asemenea, se creează un câmp magnetic uniform și variabil, a cărui inducție este proporțională cu curentul din bobina fixă.

La trecerea curentului prin bobine ca urmare a interacțiunii acestor curenți cu fluxurile magnetice ia naștere cuplul activ care tinde să rotească bobina mobilă într-o poziție în care energia câmpului magnetic a sistemului este maximă (prin bobina mobilă să treacă o parte cât mai mare a fluxului bobinei fixe, adică fluxurile celor două bobine să coincidă). Acestui cuplu i se opune cuplul rezistent al arcurilor.

Cuplul activ se calculează folosind expresia generală (2—4) în care pentru energia magne-

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{12} I_1 I_2, \quad (2-23)$$

în care L_1 și L_2 sînt inductanțele bobinelor fixă și mobilă, iar M_{12} — inductanța lor mutuală.

Dintre mărimile de care depinde W_m , numai inductanța mutuală M_{12} se schimbă o dată cu deviația α , deci expresia cuplului activ va fi:

$$M_a = \frac{dW_m}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (2-24)$$

Din această expresie rezultă că cuplul activ depinde atât de curenții prin bobine cît și de poziția reciprocă a acestora, adică de deviația α . La schimbarea concomitentă a sensului curenților I_1 și I_2 sensul cuplului activ

nu se schimbă; în consecință, dispozitivele de măsurat electrodinamice și ferodinamice pot funcționa atât în curent continuu cât și în curent alternativ.

La conectarea dispozitivului de măsurat electrodinamic sau ferodinamic în circuite de curent alternativ, cuplul activ instantaneu este:

$$m_a = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad (2-25)$$

unde i_1 și i_2 sînt valorile instantanee ale curenților în bobine. Datorită inerției sale, sistemul mobil al dispozitivului de măsurat nu poate însoți urmări variațiile cuplului activ instantaneu, deviația lui fiind determinată de valoarea medie a cuplului activ $M_{a\text{ med}}$ într-o perioadă, care pentru curenți sinusoidali are expresia:

$$M_{a\text{ med}} = \frac{1}{T} \int_0^T m_a dt = I_1 I_2 \cos(\widehat{I_1 I_2}) \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad (2-26)$$

din care rezultă că în curent alternativ cuplul activ este proporțional cu valorile eficace I_1 și I_2 ale curenților prin bobine și cu cosinusul unghiului de defazaj dintre curenți.

La echilibrarea sistemului mobil cuplul activ fiind egal cu cuplul rezistent ($M_a = M_r = D\alpha$), se deduce ecuația scării:

$$\text{— pentru curent continuu: } \alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}; \quad (2-27)$$

$$\text{— pentru curent alternativ: } \alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \cos(\widehat{I_1 I_2}) \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (2-28)$$

Din aceste expresii rezultă că deviația sistemului mobil depinde printr-o relație implicită de produsul curenților prin cele două bobine, deoarece termenul $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ este funcție de deviația α . Dependența termenului $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ de unghiul α se poate scrie în două cazuri folosite frecvent în construcția dispozitivelor de măsurat electrodinamice:

a. Cîmpul magnetic în care se mișcă bobina mobilă este radial (bobinele fixe sînt plate și astfel depărtate între ele încît bobina mobilă se mișcă perpendicular pe liniile de cîmp — figura 2-13, a), în care caz $\frac{dM_{12}}{d\alpha} \cong \text{constant}$ și deci ecuațiile scării vor fi:

$$\text{— pentru curent continuu: } \alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2; \quad (2-29)$$

$$\text{— pentru curent alternativ: } \alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \cos(\widehat{I_1 I_2}). \quad (2-30)$$

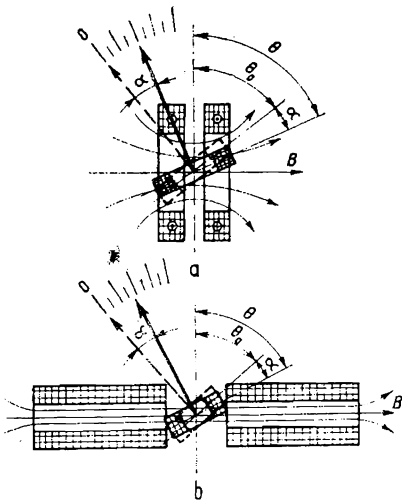


Fig. 2—13. Schema dispozitivului de măsurat electrodinamic.

b. Câmpul magnetic este uniform (bobinele fixe sînt lungi în comparație cu diametrul lor și bobina mobilă are un diametru mic — figura 2-13, b), în care caz inductanța mutuală M_{12} variind sinusoidal cu unghiul θ dintre planurile bobinelor ($M_{12} = M_{12 \max} \cos \theta$) expresia derivatei sale în raport cu deviația α este:

$$\begin{aligned} \frac{dM_{12}}{d\alpha} &= -M_{12 \max} \sin \theta = \\ &= -M_{12 \max} \sin (\theta_0 + \alpha), \end{aligned} \quad (2-31)$$

unde: $M_{12 \max}$ este valoarea maximă a inductanței mutuale M_{12} (corespunzător lui $\theta = 0$) și $\theta = \theta_0 + \alpha$, în care θ_0 este unghiul inițial dintre planurile bobinelor (corespunzător poziției de zero a sistemului mobil).

La dispozitivele de măsurat ferodinamice în întrefier câmpul este radial

(deci $\frac{dM_{12}}{d\alpha} \cong \text{constant}$), iar cuplul activ ia naștere datorită interacțiunii dintre inducția B_1 în întrefier (proporțională cu curentul I_1 din bobina fixă) și curentul I_2 în bobina mobilă. Ținînd seama de aceasta, expresia cuplului activ în circuitele de curent alternativ este:

$$M_{a \text{ med}} = k B_1 I_2 \cos (\widehat{B_1 I_2}) = k_1 I_1 I_2 \cos (\widehat{B_1 I_2}). \quad (2-32)$$

Cum însă unghiul de defazaj dintre inducția B_1 și curentul I_1 este determinat de pierderile în oțel, care practic sînt foarte mici, valoarea lui este foarte mică ($1-2^\circ$) și ca urmare se poate neglija, astfel că expresia cuplului activ al dispozitivelor de măsurat ferodinamice se poate scrie la fel ca la cele electrodinamice cu câmp magnetic radial:

$$M_{a \text{ med}} = k_1 I_1 I_2 \cos (\widehat{I_1 I_2}). \quad (2-33)$$

Caracterul scării dispozitivelor de măsurat electrodinamice este în general neliniar, datorită variației cuplului activ cu deviația.

Erorile dispozitivelor de măsurat electrodinamice și ferodinamice sînt provocate de prezența câmpurilor magnetice exterioare (numai la dispozitivele electrodinamice), de variația temperaturii mediului înconjurător și a frecvenței, precum și de curenții turbionari și de fenomenul de histeresis magnetic în miez la dispozitivele de măsurat ferodinamice.

Câmpurile magnetice exterioare provoacă o eroare suplimentară mare, deoarece intensitatea câmpului magnetic propriu al dispozitivelor de măsurat

electrodinamice este mică. Chiar și câmpul magnetic terestru ($H = 2$ Oe) influențează indicațiile dispozitivului de măsurat, eroarea putînd ajunge la 1%. Asupra dispozitivelor de măsurat ferodinamice câmpurile magnetice exterioare nu au influență deoarece câmpul propriu al acestora este puternic datorită prezenței miezului magnetic.

Pentru eliminarea influenței câmpurilor magnetice exterioare dispozitivele de măsurat electrodinamice se execută astatice sau ecranate.

Influența temperaturii asupra indicațiilor dispozitivelor de măsurat electrodinamice și ferodinamice se datorește variației rezistenței înfășurărilor bobinelor și schimbării elasticității arcurilor spirale.

Erorile datorate schimbării frecvenței apar numai la frecvențe ridicate; pînă la 150–200 Hz eroarea este sub 0,2–0,3%.

Erorile dispozitivelor de măsurat ferodinamice datorită curenților turbionari și fenomenului de histerezis magnetic se manifestă în același mod ca și la dispozitivele feromagnetice.

Proprietățile de bază ale dispozitivelor de măsurat electrodinamice sînt precizia înaltă și identitatea indicațiilor în curent continuu și în curent alternativ. Marea lor precizie se datorește absenței oțelului în interiorul bobinelor, ceea ce înlătură influența histerezisului magnetic și a curenților turbionari asupra indicațiilor. Aparatele electrodinamice sînt utilizate ca aparate de laborator (clasa 0,2–0,5) și ca aparate etalon pentru circuitele de curent alternativ.

Dezavantajele dispozitivelor de măsurat electrodinamice sînt: consumul propriu de putere ridicat (2–4 W) necesar creării și menținerii câmpului magnetic interior, rezistență mecanică scăzută la suprasarcini, preț de cost ridicat și scară neuniformă.

I. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT DE INDUCȚIE

Funcționarea dispozitivelor de măsurat de inducție se bazează pe interacțiunea dintre unul sau mai multe fluxuri magnetice alternative și curenții induși de aceste fluxuri în sistemul mobil (de obicei un disc de aluminiu). Ca urmare, dispozitivele de măsurat de inducție nu pot funcționa decît în curent alternativ.

După numărul fluxurilor magnetice care produc cuplul activ, dispozitivele de inducție se împart în:

- dispozitive de măsurat cu flux unic, în care cuplul activ este produs de un singur flux;
- dispozitive de măsurat cu fluxuri multiple în care participă două sau mai multe fluxuri la crearea cuplului activ.

a) **Dispozitivele de măsurat de inducție cu flux unic** constau dintr-un electromagnet în întrefierul căruia se rotește un disc de aluminiu așezat asimetric față de polul electromagnetului. Aceste dispozitive deși sînt simple au utilizare redusă, din cauză că au cuplu activ mic.

b) **Dispozitivele de măsurat de inducție cu fluxuri multiple** sînt de două feluri: cu cîmp magnetic de fugă și cu cîmp magnetic învîrtitor. În dispozitivele de măsurat cu cîmp magnetic de fugă fluxurile magnetice sînt defazate în timp și decalate în spațiu și formează în întrefierul polilor electromagneților un cîmp magnetic de fugă care se deplasează în spațiu de la un pol la altul, de la fluxul în avans spre cel în întîrziere. În dispozitivele de măsurat cu cîmp magnetic învîrtitor fluxurile defazate în timp și decalate în spațiu formează un cîmp magnetic care se învîrtește în spațiu cu viteza unghiulară $\omega = 2\pi f$ (unde f este frecvența curenților alternativi). În construcția aparatelor de măsurat de inducție nu se folosesc decît dispozitivele cu fluxuri multiple cu cîmp de fugă.

În figura 2-14 este reprezentată schema unui dispozitiv de măsurat cu două fluxuri cu cîmp de fugă. Acesta constă din doi electromagneți EM_1 și EM_2 în al căror întrefier se rotește un disc de aluminiu D . Prin bobinele electromagneților trec curenții I_1 și I_2 defazați cu un unghi ψ (fig. 2-15). Curenții din bobine creează fluxurile magnetice Φ_I și Φ_U care, în cazul miezurilor nesaturate, sînt sinusoidale și în fază cu curenții I_1 , respectiv I_2 . Aceste fluxuri, străbătînd discul, induc în acesta forțele electromotoare E_I și E_U , care sînt defazate în urma fluxurilor corespunzătoare cu un unghi $\frac{\pi}{2}$. Aceste forțe electromotoare dau naștere în disc la curenții I_I și I_U ,

care sînt în fază cu forța electromotoare corespunzătoare (deoarece inductanța discului este neînsemnată în comparație cu rezistența sa). Alegîndu-se un sens pozitiv pentru fluxurile magnetice Φ_I și Φ_U în miezuri (sensul de la cititor spre planul hîrtiei, notat cu $\times$), se determină după regula burghiului sensul pozitiv al curenților induși (v. fig. 2-14).

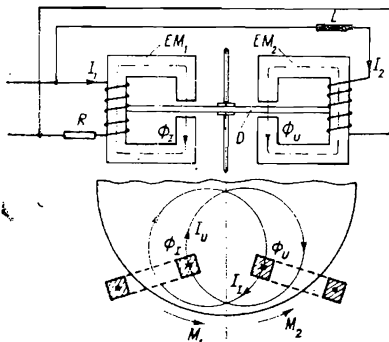


Fig. 2—14. Dispozitivul de măsurat de inducție cu două fluxuri cu cîmp de fugă.

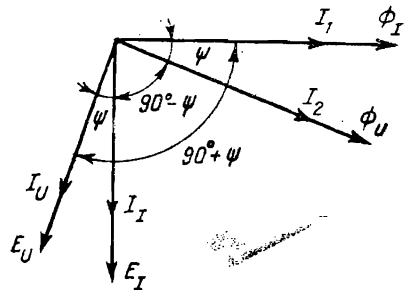


Fig. 2—15. Diagrama fazorială a fluxurilor și curenților în dispozitivele de măsurat de inducție.

Se știe că orice circuit prin care trece un curent și care se găsește într-un câmp magnetic, datorită forțelor de interacțiune a câmpului și curentului, caută să ocupe o asemenea poziție încât fluxul care străbate circuitul să fie pozitiv și să aibă valoarea maximă. În cazul discului aceasta se manifestă prin apariția unor cupluri datorită interacțiunii dintre fluxurile magnetice și curenții induși în disc.

În cazul general, considerînd interacțiunea dintre un flux oarecare $\varphi = \sqrt{2} \Phi \sin \omega t$ și un curent indus în disc $i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \alpha)$, defazat față de flux cu unghiul α , valoarea instantanee a cuplului este:

$$m = k\varphi i = k \sqrt{2} \Phi \sin \omega t \sqrt{2} I \sin(\omega t - \alpha), \quad (2-34)$$

unde k este un coeficient de proporționalitate. Deplasarea discului însă este determinată, datorită inerției sale, de valoarea medie a cuplului în cursul unei perioade:

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{1}{T} k 2\Phi I \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \alpha) dt = \\ &= k\Phi I \cos \alpha = k\Phi I \cos(\widehat{\Phi I}). \end{aligned} \quad (2-35)$$

În cazul dispozitivului de măsurat de inducție cu două fluxuri apar două cupluri, unul datorit interacțiunii dintre fluxul Φ_I și curentul I_U și al doilea datorit interacțiunii dintre fluxul Φ_U și curentul I_I . Conform relației (2-35) și ținînd seama de diagrama fazorială din figura 2-15, valoarea medie a acestor cupluri este:

$$M_1 = k_1 \Phi_I I_U \cos(\widehat{\Phi_I I_U}) = k_1 \Phi_I I_U \cos(90^\circ + \psi) = -k_1 \Phi_I I_U \sin \psi \quad (2-36)$$

$$M_2 = k_2 \Phi_U I_I \cos(\widehat{\Phi_U I_I}) = k_2 \Phi_U I_I \cos(90^\circ - \psi) = k_2 \Phi_U I_I \sin \psi. \quad (2-37)$$

Cuplurile datorite interacțiunii dintre fluxul Φ_I și curentul I_I și dintre fluxul Φ_U și curentul I_U sînt neînsemnate deoarece discul, avînd o inductanță neglijabilă, defazajul dintre fluxuri și curenții induși corespunzători (fig. 2-15) este aproape egal cu $\frac{\pi}{2}$ (conform ecuației 2-35 cuplurile au o valoare apropiată de zero). Ca urmare, discul se rotește sub acțiunea unui cuplu rezultat al celor două cupluri M_1 și M_2 .

Expresiile (2-36) și (2-37) avînd semne diferite rezultă că cuplurile M_1 și M_2 ar acționa în sensuri opuse. În realitate, cele două cupluri acționează în același sens. Semnele diferite ale celor două cupluri arată că în timp ce un cuplu acționează în sensul atragerii circuitului curentului indus în câmpul magnetic al polului electromagnetului în care se găsește, celălalt cuplu acționează în sensul respingerii. Astfel dacă cuplul M_2 acționează în sensul atragerii circuitului curentului I_I în câmpul Φ_U (fig. 2-14), cuplul M_1 acționează în sensul respingerii circuitului curentului I_U din câmpul Φ_I . Ca urmare,

ambele cupluri acționează în același sens, cuplul rezultat fiind egal cu suma lor:

$$M_a = M_1 + M_2 = k_1 \Phi_I I_U \sin \psi + k_2 \Phi_U I_I \sin \psi = (k_1 \Phi_I I_U + k_2 \Phi_U I_I) \sin \psi. \quad (2-38)$$

Sensul în care acționează acest cuplu rezultat asupra discului este întotdeauna dinspre polul parcurs de fluxul defazant înainte (Φ_I) spre cel defazat în urmă (Φ_U).

Dacă variația fluxurilor Φ_I și Φ_U este sinusoidală și rezistența discului este pur ohmică și invariabilă, curenții I_I și I_U induși în disc sînt proporționali cu fluxurile Φ_I , respectiv Φ_U care i-au produs:

$$I_I = k_3 f \Phi_I \quad \text{și} \quad I_U = k_4 f \Phi_U, \quad (2-39)$$

unde f este frecvența curentului, iar k_3 și k_4 — coeficienți de proporționalitate.

Introducînd aceste expresii în ecuația (2-38) a cuplului rezultat, se obține:

$$\begin{aligned} M_a &= (k_1 \Phi_I k_4 f \Phi_U + k_2 \Phi_U k_3 f \Phi_I) \sin \psi = (k_1 k_4 + k_2 k_3) f \Phi_I \Phi_U \sin \psi = \\ &= K f \Phi_I \Phi_U \sin \psi = K f \Phi_I \Phi_U \sin (\widehat{\Phi_I \Phi_U}), \end{aligned} \quad (2-40)$$

care este expresia generală a cuplului activ pentru toate dispozitivele de măsurat de inducție.

Pentru o frecvență constantă expresia (2-40) devine:

$$M_a = K \Phi_I \Phi_U \sin (\widehat{\Phi_I \Phi_U}), \quad (2-41)$$

adică cuplul activ este proporțional cu produsul dintre fluxurile magnetice care străbat discul și sinusul unghiului de defazaj dintre acestea.

Din expresia generală a cuplului activ rezultă că pentru crearea acestuia sînt necesare două fluxuri magnetice alternative sau două componente ale aceluiasi flux, decalate în spațiu și defazate în timp.

Decalarea fluxurilor se poate obține, în afară de utilizarea a doi sau mai mulți electromagneți decalați în spațiu și străbătuți de fluxuri defazate în timp, și cu un singur electromagnet la care o parte din pol este ecranată cu o lamelă de cupru sau este înconjurată cu o spirală în scurtcircuit care provoacă modificarea și rămînerea în urmă în timp a părții de flux care străbate ecranul sau spira.

Dispozitivele de măsurat de inducție cu ecran sau spirală în scurtcircuit se folosesc rar. În practică se utilizează aproape exclusiv dispozitivele cu trei fluxuri. Acestea constau din doi electromagneți cu fluxuri independente, dintre care unul străbate discul de două ori, astfel încît discul este străbătut de trei fluxuri. După modul de așezare a electromagneților se deosebesc două tipuri de dispozitive de inducție tripolare: tangențial (fig. 2-16, a),

în care electromagneții sînt dispuși într-un singur plan perpendicular pe raza discului, și radial (fig. 2-16, *b*), în care electromagneții sînt așezați în plane perpendiculare unul pe celălalt.

Indicațiile dispozitivelor de măsurat de inducție sînt influențate de variația temperaturii mediului înconjurător, care modifică rezistența discului

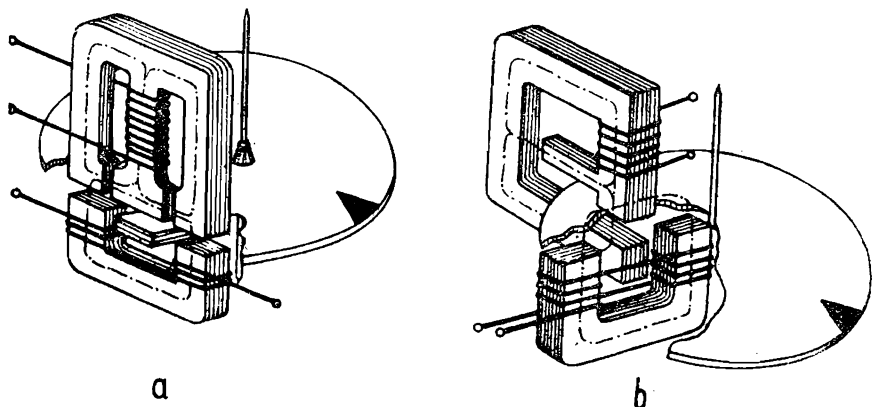


Fig. 2—16. Dispozitive de măsurat de inducție tripolare.

și deci curenții induși, și de variația frecvenței, care modifică curenții induși prin modificarea reactanței înfășurărilor electromagneților, ceea ce provoacă schimbarea defazajului curenților și fluxurile magnetice (mai ales pentru valori mari ale factorului de putere).

Dispozitivele de măsurat de inducție au un cuplu activ puternic (avînd un cîmp magnetic intens), sînt rezistente la supraîncărcări, au o funcționare sigură și consum propriu redus. Dezavantajele acestor dispozitive constau în dependența indicațiilor de frecvență și de temperatura ambiantă și scara gradată neuniformă.

J. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT ELECTROSTATICE

Funcționarea dispozitivelor de măsurat electrostatice se bazează pe acțiunea forțelor electrostatice care se exercită între unele piese metalice fixe și altele mobile între care există o diferență de potențial. Cu alte cuvinte, în dispozitivele de măsurat electrostatice pentru deplasarea sistemului mobil se folosește energia cîmpului electric a sistemului alcătuit din două sau mai multe piese metalice încărcate cu electricitate.

Diferitele construcții de dispozitive de măsurat electrostatice se reduc în fond la diverse variante ale condensatorului plan cu armături fixe și mobile. În toate cazurile deviația sistemului mobil este legată de variația capacității sistemului.

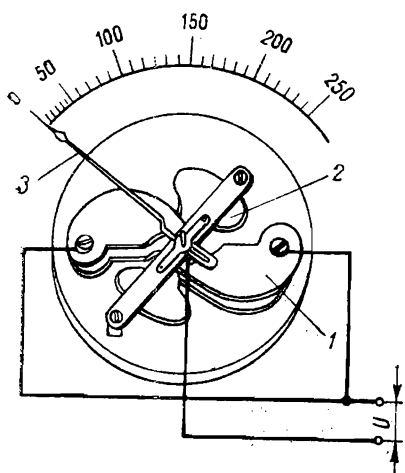


Fig. 2—17. Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variația suprafeței active a armăturilor.

fixe, tinzând să ocupe o poziție pentru care energia înmagazinată în câmpul electric are valoarea maximă.

Cuplul rezistent este produs de un arc spiral sau de firele de suspensie ale sistemului mobil.

b. **Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variația distanței dintre armături** (fig. 2-18) este alcătuit din două plăci fixe 1 și 2, între care se află o placă mobilă 3, suspendată cu două benzi subțiri de bronz 4. Placa mobilă

Această variație a capacităților se poate realiza prin variația suprafeței active a armăturilor sau prin variația distanței dintre acestea, ceea ce a condus la construcția a două tipuri de dispozitive de măsurat electrostatice.

a. **Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variația suprafeței active a armăturilor** (fig. 2-17) constă din două perechi de plăci metalice fixe 1, așezate paralel și două plăci mobile 2 de aluminiu în formă de sector circular fixate pe același ax cu acul indicator 3. Plăcile fixe sînt legate între ele din punct de vedere electric.

Aplicînd tensiunea de măsurat între armăturile fixe și cele mobile, acestea se încarcă cu electricitate de semn contrar. Între armături ia naștere un câmp electric, sub acțiunea căruia armăturile mobile se rotesc în spațiul dintre armăturile

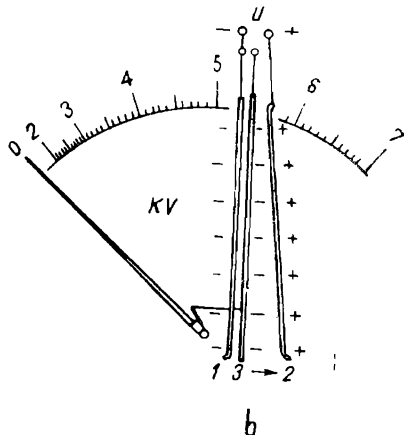
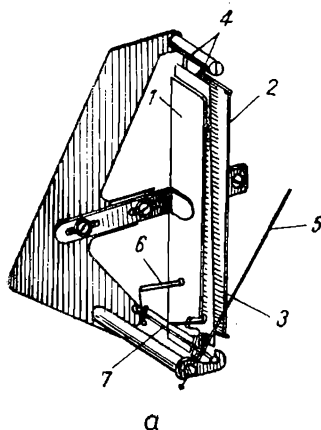


Fig. 2 — 18 Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variația distanței dintre armături.

este legată electric cu una din plăcile fixe 1 și este izolată de cealaltă. Aplicând tensiunea de măsurat la bornele aparatului, placa mobilă și placa fixă 1 se încarcă cu electricitate de același semn, iar placa fixă 2 cu electricitate de semn contrar. Datorită acestui fapt placa mobilă este respinsă de placa fixă 1, fiind atrasă de placa fixă 2. Această deplasare se transmite acului indicator 5 al aparatului prin intermediul tijei 6, care face legătura între placa mobilă și axul 7.

Cuplul rezistent al acestor dispozitive este dat de greutatea plăcilor mobile, ceea ce constituie un neajuns deoarece necesită ca dispozitivul să fie totdeauna astfel așezat încât în lipsa tensiunii acul indicator să stea pe reperul zero.

Expresia cuplului activ al dispozitivelor de măsurat electrostatice se deduce folosind ecuația generală (2-4) a cuplului activ. În acest caz energia potențială a câmpului electric a condensatorului format din piesele metalice ale dispozitivului de măsurat când li se aplică tensiunea U este:

$$W_m = \frac{1}{2} U^2 C, \quad (2-42)$$

în care C este capacitatea sistemului.

Deviația sistemului mobil datorindu-se numai variației capacității, cuplul activ este:

$$M_a = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (2-43)$$

La echilibrul sistemului mobil cuplul activ fiind egal cu cuplul rezistent ($M_a = M_r = D\alpha$), se deduce ecuația scării:

$$\alpha = \frac{1}{2D} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (2-44)$$

Din această ecuație rezultă că deviația sistemului mobil depinde de pătratul tensiunii și de schimbarea capacității dispozitivului de măsurat. Ca urmare, scara gradată a aparatului este neuniformă. Prin alegerea unor anumite forme și dimensiuni pentru plăcile fixe și mobile se poate obține la dispozitivul de măsurat cu variația suprafeței active a armăturilor, o scară gradată aproape uniformă. La dispozitivele de măsurat cu variația distanței dintre armături nu este posibilă uniformizarea scării gradate prin modificarea formei plăcilor.

La conectarea dispozitivului de măsurat electrostatic într-un circuit de curent alternativ, felul încărcărilor electrostatice ale plăcilor variază ca și tensiunea, iar forța de acțiune reciprocă dintre plăci rămâne îndreptată în aceeași direcție. Deviația sistemului mobil este determinată de valoarea cuplului activ mediu, în cursul unei perioade, proporțională cu pătratul valorii eficace a tensiunii aplicate.

Dispozitivele de măsurat electrostatice nu sînt influențate de temperatura mediului înconjurător, de câmpurile magnetice exterioare, de frecvența

sau forma curbei mărimii de măsurat, astfel că acestea nu constituie surse de erori. Asupra funcționării dispozitivelor de măsurat electrostatice au o mare influență doar câmpurile electrice exterioare deoarece câmpul electric propriu este relativ mic. Pentru micșorarea acestei influențe, dispozitivele de măsurat sînt prevăzute cu ecrane electrostatice.

Aparatele de măsurat electrostatice pot fi utilizate numai ca voltmetre, pentru măsurarea directă a tensiunilor în curent continuu și alternativ.

Consumul propriu de energie foarte redus constituie principalul avantaj al voltmetrelor electrostatice. La măsurarea în curent continuu, consumul lor este practic egal cu zero.

Precizia aparatelor electrostatice este limitată, clasa de precizie a lor fiind 1—1,5.

K. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT TERMICE CU FIR CALD

Funcționarea dispozitivelor de măsurat termice cu fir cald se bazează pe proprietatea firelor metalice de a se alungi sub acțiunea termică a curentului electric care le străbate.

În figura 2-19 este reprezentată construcția unui dispozitiv de măsurat cu fir subțire. Elementul principal al dispozitivului îl constituie firul metalic subțire 1, din aliaj de platină cu iridiu sau cu argint, fixat rigid la ambele capete în clemenele 2 și 3. De acest fir este prins un al doilea fir de bronz fosforos 4 fixat cu celălalt capăt de șasiul aparatului, la un mecanism corector de zero 5. De mijlocul celui de al doilea fir este legat un fir de mătase 6, care este înfășurat după o mică rolă 7 și întins la cealaltă extremitate de arc

de oțel plat 8. Acest arc ține întinse toate cele trei fire ale aparatului. Rola 7 este fixată pe un ax, pe care se mai găsește și acul indicator 9 și un sector circular de aluminiu 10, care se mișcă între polii unui magnet permanent 11, constituind amortizorul magnetic al dispozitivului.

La trecerea curentului de măsurat prin firul metalic subțire 1, acesta se încălzește alungindu-se. În acest caz sub acțiunea arcului plat 8 punctul de legătură a firului 4 cu firul 1 se deplasează în jos și ca urmare firul de mătase se mișcă spre stînga o dată cu extremitatea arcului plat.

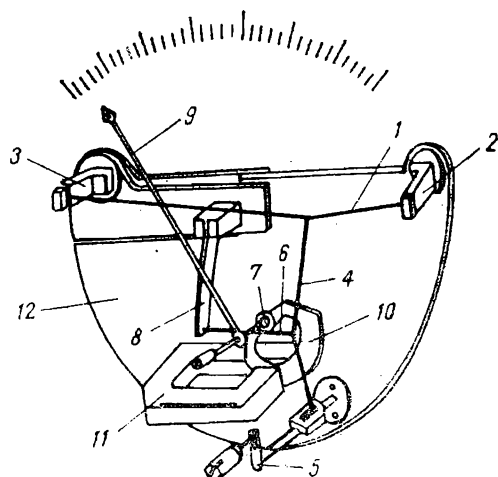


Fig. 2—19 Dispozitivul de măsurat termic cu fir cald.

Prin aceasta rola 7 se rotește și o dată cu ea și acul indicator. În acest mod, alungirea firului se transformă într-o mișcare de rotație a axului cu acul indicator. Printr-o alegere corespunzătoare a lungimii celor trei fire și a diametrului rolei, o alungire extrem de mică a firului (de ordinul unei zecimi de milimetru) se poate transforma într-o rotație a axului de 90° .

Se remarcă că spre deosebire de celelalte dispozitive de măsurat, cuplul activ al dispozitivelor termice cu fir cald este creat de arcul plat și nu depinde de mărimea de măsurat, iar cuplul rezistent este dat de elementul activ, firul metalic prin care trece curentul.

Dependența dintre unghiul de deviație al acului și curentul de măsurat se stabilește ținându-se seama de faptul că alungirea Δl a firului este proporțională cu diferența de temperatură ($\Delta\theta = \theta - \theta_0$) a firului înainte și după încălzirea datorită trecerii curentului I :

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \beta (\theta - \theta_0), \quad (2-45)$$

unde l_0 și l reprezintă lungimea firului încălzit la temperatura inițială θ_0 și respectiv încălzit la temperatura θ , iar β este coeficientul de dilatație liniară a firului. Diferența de temperatură este proporțională cu cantitatea de căldură Q_1 , cedată mediului înconjurător când firul s-a încălzit la temperatura de regim. Dacă cedarea de căldură se face prin radiație și convecție și se consideră că se efectuează numai prin suprafața laterală S a firului (se neglijează cedarea de căldură prin capetele firului), cantitatea de căldură degajată în unitatea de timp este:

$$Q_1 = CS(\theta - \theta_0), \quad (2-46)$$

unde C este coeficientul total de transmisie a căldurii.

În stare de echilibru termic cantitatea de căldură degajată este egală cu cantitatea de căldură produsă Q care este proporțională cu pătratul intensității curentului:

$$Q = 0,24 I^2 R. \quad (2-47)$$

Din egalitatea relațiilor (2-46) și (2-47) rezultă pentru diferența de temperatură:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = \frac{0,24 RI^2}{CS} = kI^2, \quad (2-48)$$

unde $k = \frac{0,24 R}{CS}$ este o constantă de proporționalitate presupunând că S , C și R nu variază cu creșterea temperaturii.

Introducând această expresie în relația (2-45), se obține:

$$\Delta l = l_0 \beta k I^2 = K I^2, \quad (2-49)$$

unde K este un factor de proporționalitate.

Rezultă deci că alungirea firului și, în consecință, și deviația acului indicator care este funcție de aceasta depinde de pătratul intensității curentului care trece prin fir [$\alpha = f(I^2)$]. Ca urmare, scara gradată a aparatelor termice cu fir cald este neuniformă, cu caracter pătratic.

Prin măsuri constructive, ca: așezarea excentrică a rolei pe ax, alegerea unor anumite puncte de legătură a firelor între ele ș.a. se poate realiza o uniformizare a scării gradate pe o porțiune destul de mare a ei.

Dispozitivele de măsurat termice cu fir cald dau indicații identice atât în curent continuu cât și în curent alternativ. Ca urmare, ele pot fi etalonate în curent continuu, ceea ce constituie un avantaj.

Funcționarea acestor dispozitive de măsurat nu este influențată de câmpurile magnetice și electrice exterioare, de forma curentului alternativ și de frecvență. Independența indicațiilor de frecvență (ca urmare a lipsei totale de inductanță a firului activ) este o mare calitate a aparatelor termice cu fir cald, care permite utilizarea lor la frecvențe înalte (de ordinul kiloherților).

Indicațiile dispozitivelor de măsurat termice cu fir cald sînt influențate în mare măsură de temperatura mediului ambiant, ceea ce constituie unul din principalele dezavantaje. Pentru micșorarea acestei influențe, dispozitivul de măsurat se montează pe o placă de compensare 12 (v. fig. 2-19) dintr-un material al cărui coeficient de dilatare este egal cu cel al firului activ. Cu toate acestea nu se poate realiza o stabilitate deplină a poziției de zero a acului indicator; de aceea aparatele termice cu fir cald se înzestrează totdeauna cu un corector care readuce acul la zero, prin schimbarea întinderii firului.

Datorită diametrului foarte mic al firului activ, aparatele termice cu fir cald nu se pot supraîncărca aproape de loc.

L. DISPOZITIVELE DE MĂSURAT LOGOMETRICE

Logometrele sînt dispozitive de măsurat care măsoară raportul a doi curenți sau tensiuni. Oricare din tipurile de dispozitive de măsurat (cu excepția celor electrostatice și termice cu fir cald) pot fi realizate ca logometre, dacă cuplul rezistent este creat în același mod ca și cuplul activ de forțe electromagnetice.

Logometrele măsurînd raportul a doi curenți, conțin totdeauna două elemente mobile, asupra fiecăruia din ele acționînd unul din curenți. Aceste elemente îmbinate formează sistemul mobil al logometrului. Sensul celor doi curenți este astfel ales încît cuplurile create de fiecare din ei să fie îndreptate în sensuri contrare: unul dintre cupluri este astfel cuplu activ, iar celălalt cuplu rezistent. Sub acțiunea diferenței dintre cele două cupluri, sistemul mobil se rotește; pe măsura rotirii, cuplul mai mare (activ) se micșorează, iar cel mai mic (rezistent) crește, pînă la echilibrarea sistemului.

mobil cînd cuplurile devin egale. Pentru aceasta cuplurile active (amîndouă sau cel puțin unul dintre ele) depind de unghiul de rotație a sistemului mobil:

$$M_1 = k_1 I_1^n f_1(\alpha); \quad (2-50)$$

$$M_2 = k_2 I_2^n f_2(\alpha), \quad (2-51)$$

unde: I_1 și I_2 sînt curenții prin dispozitivul de măsurat, $n = 1$ sau $n = 2$, după tipul dispozitivului de măsurat, k_1 și k_2 sînt două constante de proporționalitate, iar funcțiile $f_1(\alpha)$ și $f_2(\alpha)$ exprimă dependența cuplurilor de unghiul de rotație.

La echilibru cuplurile fiind egale ($M_1 = M_2$), se poate scrie:

$$k_1 I_1^n f_1(\alpha) = k_2 I_2^n f_2(\alpha),$$

de unde rezultă:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^n = \frac{k_2 f_2(\alpha)}{k_1 f_1(\alpha)} = kf(\alpha) \quad (2-52)$$

sau:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (2-53)$$

Această relație arată că deviația sistemului mobil al logometrelor este funcție de raportul curenților cu condiția ca funcțiile $f_1(\alpha)$ și $f_2(\alpha)$ să fie diferite.

Deoarece logometrele nu au cuplu rezistent mecanic, cînd nu trece curent prin aparat asupra sistemului mobil nu acționează nici un cuplu, și astfel acesta poate ocupa orice poziție.

La logometrele cu bobine mobile curenții sînt aduși la bobine prin benzi flexibile de argint sau aur care în mod practic nu creează cuplu rezistent.

La logometrele megnetoelectrice, electrodinamice și ferodinamice sistemul mobil constă din două bobine fixate rigid pe ax și încrucișate sub un anumit unghi (90° , 60° sau mai mic). Dependența cuplurilor de unghiul de rotație se obține la dispozitivele magnetoelectrice (fig. 2-20, *a*) și ferodinamice (fig. 2-20, *c*) prin crearea unui cîmp magnetic variabil cu deviația α realizat cu un întrefier neuniform, iar la dispozitivele electrodinamice (fig. 2-20, *b*) prin variația inductanței mutuale cu deviația α (dispozitivele cu cîmp magnetic uniform). Se construiesc și logometre ferodinamice cu întrefier uniform (fig. 2-20, *d*) la care se realizează numai dependența unuia dintre cupluri (cel rezistent) de unghiul de rotație a sistemului mobil, închinînd una din bobinele mobile pe o reacțanță oarecare; în acest caz cuplul care acționează asupra acestei bobine depinde de deviația α , deoarece pe măsura rotirii bobinei crește forța electromotoare indusă și ca urmare și curentul care ia naștere.

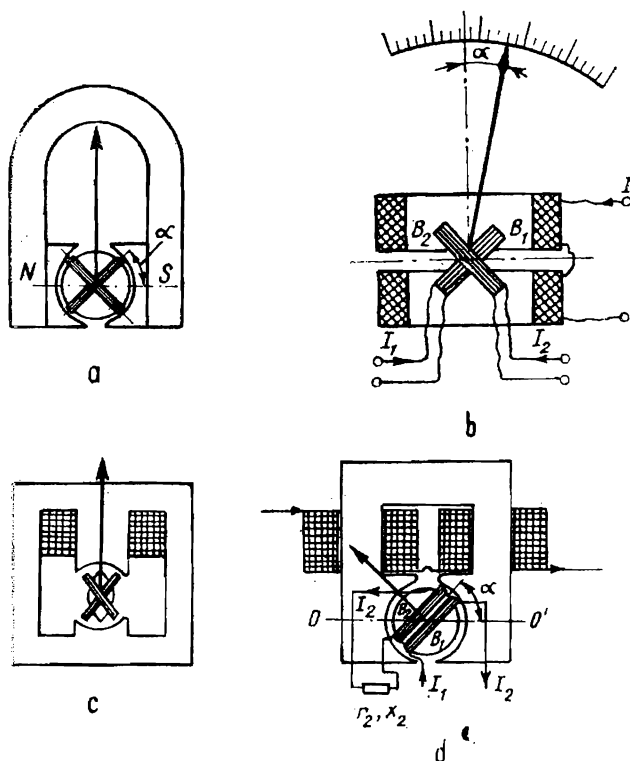


Fig. 2—20. Logometre magnetoelectrice, electrodinamice și ferodinamice.

Logometrele feromagnetice (fig. 2-21) sînt constituite în general din două dispozitive identice de repulsie sau de atracție montate pe același ax și în opoziție, astfel că cele două cupluri sînt de sens contrar.

Logometrele magnetoelectrice au cea mai mare utilizare fiind folosite la măsurarea rezistențelor (ohmmetre) și a mărimilor neelectrice. Celelalte tipuri de logometre se folosesc mai ales la măsurarea frecvenței, factorului de putere, capacității etc.

M. ERORILE APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

1. EROAREA DE INDICAȚIE A APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Valoarea indicată de un aparat de măsurat se deosebește de valoarea adevărată a mărimii măsurate datorită erorilor sale. Diferența dintre indicația aparatului și valoarea adevărată a mărimii măsurate nu se poate afla

deoarece aceasta din urmă nu poate fi determinată oricât de precise ar fi aparatele de măsurat etalon folosite. Valoarea cea mai apropiată de această diferență se obține referind indicația aparatului x_i la valoarea efectivă X_e a mărimii măsurate cu un aparat mult mai precis (aparat etalon). Diferența dintre aceste două valori constituie *eroarea de indicație* a aparatului de măsurat:

$$\Delta_i = x_i - X_e. \quad (2-54)$$

Eroarea de indicație a unui aparat de măsurat admisă de prevederile unui standard de stat, ale unei instrucțiuni de verificare sau ale unei norme interne se numește *eroare tolerată de indicație* a aparatului de măsurat.

Eroarea de indicație, la fel ca și eroarea de măsurare, nu exprimă gradul de precizie al măsurării; acesta este dat de *eroarea relativă a indicației* aparatului Δ_α , care este raportul dintre eroarea de indicație Δ_i și valoarea efectivă a mărimii măsurate X_e :

$$\Delta_\alpha = \frac{\Delta_i}{X_e} = \frac{x_i - X_e}{X_e}. \quad (2-55)$$

Dacă eroarea de indicație se raportează la limita superioară de măsurare X_m a aparatului de măsurat, se obține *eroarea raportată a indicației* aparatului:

$$\Delta_\alpha = \frac{\Delta_i}{X_m} = \frac{x_i - X_e}{X_m}. \quad (2-56)$$

Eroarea raportată nu caracterizează gradul de precizie al măsurării, ci precizia aparatului de măsurat. Raportul dintre eroarea tolerată (pozitivă sau negativă) și limita superioară de măsurare a aparatului de măsurat exprimată în procente definește *clasa de precizie* a aparatului. Aceasta constituie o caracteristică a aparatelor de măsurat electrice, după care se face clasificarea lor din punctul de vedere al preciziei. Clasa de precizie se exprimă printr-un număr, numit *indice de clasă* (C), care se găsește scris pe cadranul fiecărui aparat.

Din definiția clasei de precizie rezultă că indicele de clasă se exprimă matematic sub forma:

$$C = \frac{\Delta_i \text{ ad}}{X_m} 100\%, \quad (2-57)$$

unde:

$\Delta_i \text{ ad}$ este eroarea tolerată de indicație a aparatului;

X_m — limita superioară de măsurare.

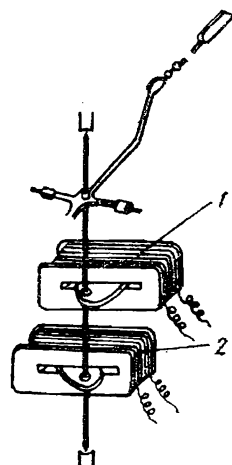


Fig. 2—21. Logometru feromagnetic.

Din această relație rezultă că eroarea tolerată de indicație admisă pentru aparatul de măsurat folosit, în orice punct al scării, exprimată în unitățile scrise pe scara sa, este:

$$\Delta_{i\ ad} = \frac{C}{100} X_m. \quad (2-58)$$

Astfel pentru un ampermetru de clasă de precizie 0,5 și limita superioară de măsurare $X_m = 5A$, eroarea tolerată de indicație este:

$$\Delta_{i\ ad} = \frac{C}{100} X_m = \frac{0,5}{100} 5 = 0,025 \text{ A.}$$

2. CAUZELE ERORILOR APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Eroarea de indicație a aparatelor de măsurat electrice comportă atât erori sistematice (instrumentale) cât și erori întâmplătoare. Primele se datoresc imperfecțiunilor de construcție, care dau erori constante ca mărime și de același semn pe un interval de timp destul de lung. Erorile întâmplătoare nu au caracter determinat, datorindu-se unor imperfecțiuni de construcție cu caracter neregulat — erori fundamentale — sau influenței variației diferiților factori externi asupra indicațiilor aparatului — erori suplimentare.

Erorile instrumentale se datoresc gradării și montării greșite a scării și reglajului insuficient de precis a dispozitivului de măsurat, care conduce la coincidență imperfectă a indicațiilor scării gradate cu valorile efective ale mărimii de măsurat.

Erorile fundamentale sînt produse de frecările în lagărele sistemului mobil, înclinarea axului sistemului mobil, echilibrarea imperfectă a sistemului mobil, deformația remanentă a arcurilor care dau cuplul rezistent datorită suprasolicităților mecanice, influența cîmpurilor magnetice și electrice interioare asupra elementelor active.

Erorile suplimentare se datoresc variației temperaturii mediului înconjurător, influenței cîmpurilor magnetice sau electrice exterioare, variației frecvenței, tensiunii sau curentului și schimbării poziției aparatului față de poziția normală de funcționare.

Capitolul III

MĂSURAREA CURENȚILOR ȘI TENSIUNILOR

Curenții și tensiunile care se măsoară în practica industrială sau de laborator pot avea valori foarte diferite, de la ordinul microamperilor și microvolților pînă la sute de amperi și mii de volți, cu frecvențe variind de la 0 (curent continuu) pînă la sute de megaherți. Metodele și aparatele pentru măsurarea unui domeniu atît de larg de curenți și tensiuni diferă după ordinul de mărime al acestora și după precizia cu care trebuie efectuată măsurarea. În general, curenții și tensiunile se măsoară prin metode de citire cu aparate indicatoare (galvanometre, ampermetre și voltmetre) de tipuri diferite după domeniul de măsurare. În măsurările de mare precizie se utilizează metode de compensație.

A. MĂSURAREA CURENȚILOR ȘI TENSIUNILOR FOARTE MICI CU AJUTORUL GALVANOMETRELOR

Curenții și tensiunile foarte mici ($10^{-6} \dots 10^{-11}$ A și $10^{-4} \dots 10^{-8}$ V) se măsoară și se detectează cu ajutorul galvanometrelor de curent continuu și de curent alternativ.

Galvanometrele sînt aparate de foarte mare sensibilitate ($10^5 \dots 10^{11} \frac{\text{mm}}{\text{A}}$).

Ele se utilizează fie ca aparate indicatoare pentru măsurarea valorilor foarte mici ale curenților, tensiunilor sau cantităților de electricitate, fie ca aparate de zero în metode de comparație, pentru a indica lipsa curentului sau tensiunii într-un circuit.

Galvanometrele, folosindu-se în general ca aparate de zero, au scara gradată în diviziuni cu zero la mijloc. Pentru măsurarea valorii curenților sau tensiunilor, galvanometrele se etalonează în prealabil în condițiile concrete de utilizare.

Datorită valorilor foarte mici ale mărimilor de măsurat și deci a unui cuplu activ extrem de redus, pentru obținerea unei sensibilități ridicate, galvanometrele se construiesc:

— cu sistemul mobil suspendat pe benzi tensionate (v. fig. 2-2, *a*) sau pe fir de torsiune (suspensie liberă ca în figura 2-2, *b*), care elimină frecările în lagăre și produc un cuplu rezistent mic;

— cu indicatoare cu oglindă și spot luminos (v. fig. 2-4), care dau deviații relativ mari pe scara gradată pentru deviații foarte mici ale sistemului mobil;

— cu circuite magnetice cu forme și din aliaje speciale, care asigură o inducție mare în întrefier.

Galvanometrele pot fi fixe sau portative. Galvanometrele fixe se construiesc cu indicator cu oglindă și spot luminos și riglă gradată exterioară (v. fig. 2-4, *a*), iar cele portative cu indicator cu oglindă și spot luminos și cadran interior (fig. 2-4, *b*) sau cu ac indicator.

Se construiesc galvanometre de diverse tipuri; cele mai utilizate sînt galvanometrele magnetoelectrice cu bobină mobilă, folosite atît în curent continuu cît și în curent alternativ, sau cu magnet mobil, utilizate numai în curent alternativ.

1. GALVANOMETRUL MAGNETOELECTRIC CU BOBINĂ MOBILĂ

Galvanometrul magnetoelectric cu bobină mobilă, constructiv se aseamănă foarte mult cu dispozitivul de măsurat magnetoelectric descris în capitolul II. Deosebiriile constau numai în particularitățile caracteristice tuturor galvanometrelor.

În figura 3-1 este reprezentat un galvanometru magnetoelectric de mare sensibilitate cu suspensie liberă, cu indicator cu oglindă și spot luminos și riglă gradată exterioară. Dispozitivul de măsurat constă dintr-un magnet permanent 1, a cărui inducție în întrefier poate fi reglată între limite largi, cu ajutorul unui șunt magnetic, miezul cilindric 2 și bobina mobilă 3, suspendată de firul de torsiune 4, pe care este fixată și oglinda 5. Firul de suspensie este așezat într-un tub protector 6 (fig. 3-1, *b*), capătul său superior fiind prins de șurubul corectorului de zero 7. Firul de suspensie servește totodată la producerea cuplului rezistent și la aducerea curentului la bobina mobilă. Ieșirea curentului din bobină se face printr-un conductor 8 din aur sau argint, foarte subțire și buclat pentru a nu influența mișcarea sistemului mobil.

Funcționarea galvanometrului magnetoelectric cu bobină mobilă este determinată de valoarea rezistenței circuitului de măsurare în care este conectat. La închiderea sau deschiderea circuitului de măsurare, alimentat de la o sursă de curent continuu, sistemul mobil al galvanometrului se oprește la noua poziție de echilibru, printr-o mișcare de stabilire (fig. 3-2), al cărei caracter și durată (timpul de amortizare) depind de mărimea rezistenței circuitului exterior. Aceasta se explică prin faptul că la galvanometre din cauza lipsei carcasei metalice a bobinei mobile și a vreunui alt amortizor special, mișcarea sistemului mobil se amortizează numai datorită curenților induși în spirele bobinei mobile, cînd aceasta este închisă pe o rezistență oarecare a circuitului exterior. Valoarea acestor curenți (și deci a amorti-

zării datorită interacțiunii dintre aceștia și câmpul magnetului permanent) este determinată de valoarea rezistenței circuitului exterior. Când galvanometrul este închis pe o rezistență exterioară mare sistemul mobil se stabilește la poziția de echilibru, efectuând o serie de oscilații amortizate (curba I din

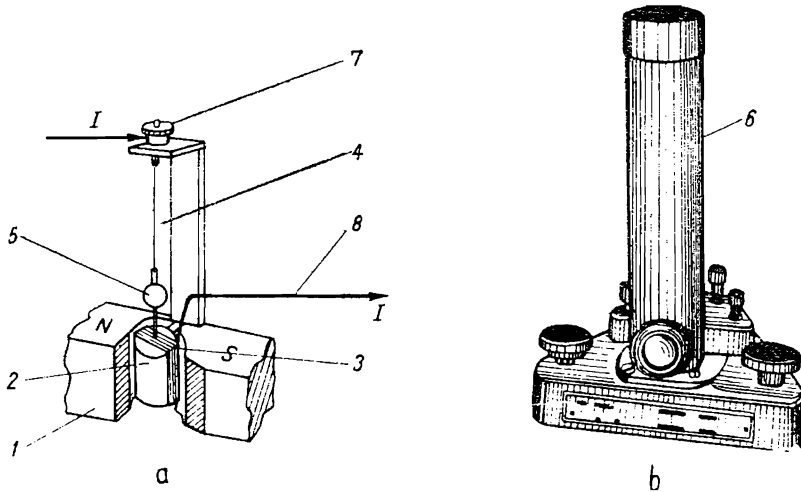


Fig. 3—1 Galvanometru magnetoelectric cu bobină mobilă:
a — dispozitivul de măsurat; b — vedere exterioară.

figura 3-2), adică printr-o *mișcare oscilatorie amortizată*. Micșorînd rezistența exterioară, crește gradul de amortizare și ca urmare numărul și durata oscilațiilor scad. Sub o anumită valoare a rezistenței exterioare sistemul mobil se stabilește la echilibru printr-o singură oscilație (curba II și III din figura 3-2), adică printr-o *mișcare aperiodică*, a cărei durată însă crește cu cît rezistența exterioară se micșorează. Pentru, rapiditatea efectuării măsurărilor, galvanometrul trebuie să funcționeze în regimul de mișcare aperiodică pentru care timpul de amortizare este minim (curba II din figura 3-2). Mișcarea se numește în acest caz *aperiodică critică*, iar rezistența circuitului care îi corespunde — *rezistență critică exterioară*. Rezistența, egală cu suma rezistenței critice exterioare și a rezistenței proprii a galvanometrului, se numește *rezistență critică totală a galvanometrului*.

Drept măsură a sensibilității galvanometrelor servește deviația sistemului

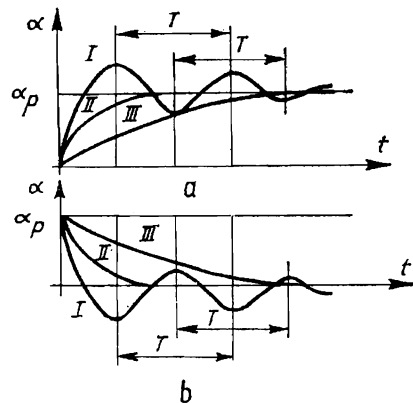


Fig. 3—2. Curbele de mișcare ale sistemului mobil al galvanometrului:
a — la închiderea circuitului; b — la deschiderea circuitului.

mobil provocată de unitatea mărimii de măsurat. Se deosebesc sensibilitatea galvanometrului față de curent și sensibilitatea față de tensiune.

Sensibilitatea de curent S_I reprezintă deviația indicatorului, în număr de diviziuni ale scării gradate la galvanometrele cu cadran interior sau în milimetri pe rigla gradată aflată la o distanță de 1 m de oglindă la galvanometrele cu riglă exterioară, când prin bobina mobilă trece un curent egal cu unitatea (de obicei 1 μA):

$$S_I = \frac{\alpha}{I}, \quad (3-1)$$

unde I este curentul care trecând prin bobina mobilă deviază indicatorul cu α diviziuni.

Adeseori sensibilitatea de curent a galvanometrelor se exprimă prin mărimea sa inversă, *constanta de curent*:

$$C_I = \frac{1}{S_I} = \frac{I}{\alpha}. \quad (3-2)$$

Sensibilitatea de tensiune S_U a unui galvanometru reprezintă deviația sistemului mobil provocată de aplicarea la bornele aparatului în serie cu o rezistență egală cu rezistența critică exterioară, a unei tensiuni egale cu unitatea (de obicei 1 μV):

$$S_U = \frac{\alpha}{U}, \quad (3-3)$$

unde U este tensiunea care aplicată la bornele galvanometrului provoacă deviația indicatorului cu α diviziuni.

Mărimea inversă a sensibilității de tensiune, *constanta de tensiune* C_U , este:

$$C_U = \frac{1}{S_U} = \frac{U}{\alpha}. \quad (3-4)$$

Dacă rezistența critică totală este R_c , la trecerea curentului I căderea de tensiune U la bornele aparatului va fi:

$$U = IR_c,$$

în consecință:

$$S_U = \frac{\alpha}{IR_c} = \frac{S_I}{R_c}. \quad (3-5)$$

Rezultă deci că sensibilitatea de tensiune a galvanometrelor este egală cu sensibilitatea de curent împărțită la rezistența critică totală.

Galvanometrele cu sensibilitate de curent mare au perioadă de oscilație și rezistență critică mare și ca urmare, așa cum reiese din relația 3-5, sensibilitatea de tensiune mică. Galvanometrele cu sensibilitate de curent relativ mică și rezistență critică mică au sensibilitate mare de tensiune.

Pentru măsurarea unor curenți sau tensiuni mai mari decât cele corespunzătoare sensibilității de curent sau de tensiune, galvanometrele se utilizează împreună cu șunturi sau rezistențe adiționale.

2. GALVANOMETRUL BALISTIC

În anumite cazuri, de exemplu la măsurarea capacităților sau în practica măsurărilor magnetice, este necesar să se măsoare cantități de electricitate ale impulsurilor de curent de scurtă durată. În acest scop se folosesc galvanometrele balistice. Acestea sînt galvanometre magnetoelectrice cu perioadă mare de oscilație a sistemului mobil, care are un moment de inerție mare. Orice galvanometru magnetoelectric poate fi utilizat ca galvanometru balistic, dacă se mărește momentul de inerție al sistemului său mobil prin atașarea pe acesta a unor greutateți suplimentare, ca cilindru (fig. 3-3, *a*) sau bile (fig. 3-3, *b*).

Funcționarea galvanometrului balistic se caracterizează prin aceea că sistemul său mobil începe să se miște numai după trecerea impulsului de curent prin bobina mobilă, atinge o deviație maximă α_m , după care revine în poziția de zero prin cîteva oscilații sau aperiodic (fig. 3-4).

Dacă durata τ a trecerii impulsului de curent I este mai mică decît perioada de oscilație a sistemului mobil a galvanometrului, deviația maximă α_m a acestuia este proporțională cu cantitatea de electricitate Q care trece prin bobina mobilă:

$$Q = \int_0^{\tau} i \, dt = C_b \alpha_m, \quad (3-6)$$

unde:

$$C_b = \frac{Q}{\alpha_m} \quad (3-7)$$

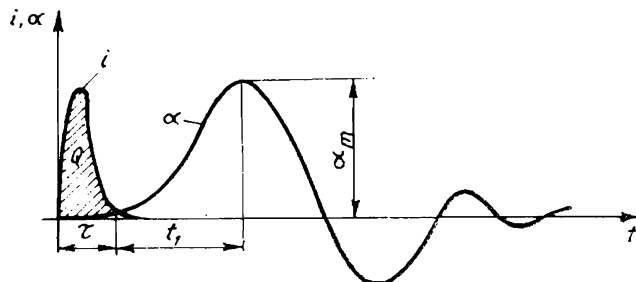


Fig. 3—4. Curbele impulsului de curent și ale deviației galvanometrului balistic.

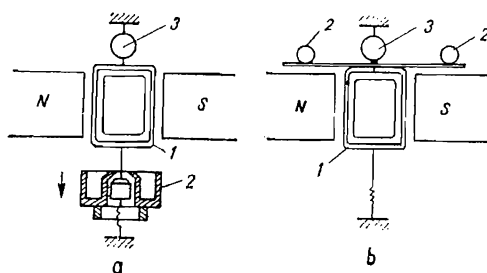


Fig. 3—3. Sistemul mobil al galvanometrului balistic:

1 — bobina mobilă; 2 — cilindru sau bile suplimentare pentru mărirea momentului de inerție; 3 — oglinda.

este *constanta balistică* a galvanometrului și reprezintă cantitatea de electricitate corespunzătoare rotirii sistemului mobil al galvanometrului cu 1 mm pe scara gradată.

Sensibilitatea balistică este definită ca inversul constantei și reprezintă deviația maximă a galvanometrului la trecerea unei cantități de electricitate egală cu unitatea. Ea este dată de relația:

$$S_b = \frac{1}{C_b} = \frac{\alpha_m}{Q}. \quad (3-8)$$

Sensibilitatea balistică depinde de gradul de amortizare, deci de rezistența pe care este închis galvanometrul. De aceea, de fiecare dată când se folosește galvanometrul balistic este necesar ca să se stabilească mai întâi experimental sensibilitatea sa corespunzătoare rezistenței circuitului în care este conectat. Schimbarea sensibilității galvanometrului balistic se realizează la fel ca și la galvanometrul prin șuntare.

3. GALVANOMETRUL DE REZONANȚĂ

Galvanometrele obișnuite nu pot fi folosite în circuite de curent alternativ, deoarece sistemul mobil, datorită inerției sale, nu poate urmări variațiile curentului în bobină în decursul fiecărei perioade și ca urmare el rămâne pe loc sau trepidează ușor.

Pentru măsurarea și detectarea curenților alternativi se întrebuițează galvanometrele de rezonanță. Acestea sînt galvanometre de tip magnetoelectric, sistemul lor mobil avînd un moment de inerție foarte mic, astfel încît frecvența oscilațiilor sale proprii poate fi făcută egală cu frecvența curentului de măsurat în bobină. În cazul egalității celor două frecvențe apare fenomenul de rezonanță mecanică, datorită căruia oscilațiile sistemului mobil ating amplitudini maxime foarte mari, ceea ce conferă galvanometrelor de rezonanță o sensibilitate ridicată ($10^7 - 10^8$ mm/A).

Galvanometrele magnetoelectrice de rezonanță sînt de trei tipuri: cu plăcuță magnetizată, cu magnet mobil și cu bobina mobilă.

Galvanometrul de rezonanță cu plăcuță mobilă magnetizată (fig. 3-5) se compune dintr-un electromagnet 1, alimentat cu curent continuu, de polii căruia sînt fixate piesele polare 2 și 3 de formă specială, care concentrează fluxul magnetic continuu în întrefierul în care se găsește o plăcuță 4 de fier moale. Plăcuța este suspendată pe două

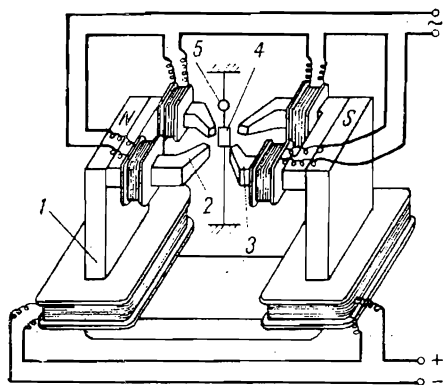


Fig. 3—5. Dispozitivul de măsurat al galvanometrului de rezonanță cu plăcuță mobilă magnetizată.

benzi tensionate care creează în același timp și cuplul rezistent, împreună cu fluxul magnetic continuu. Pe una din benzile tensionate este fixată și oglinda 5 a indicatorului cu spot luminos.

Piesele polare 2 și 3 poartă câte o înfășurare de magnetizare prin care trece curentul alternativ de măsurat, transformându-se astfel în câte un electromagnet de curent alternativ ce produce un flux alternativ, perpendicular pe fluxul continuu.

Cele două fluxuri acționează simultan asupra plăcuței, poziția acesteia fiind determinată de fluxul rezultat. Unul din fluxuri fiind constant iar cel de-al doilea variind periodic ca mărime și ca sens, fluxul rezultat variază și el periodic și ca urmare plăcuța oscilează cu o frecvență egală cu cea a curentului alternativ de măsurat. Frecvența proprie a oscilațiilor libere ale plăcuței poate fi modificată prin variația curentului continuu, adică prin variația cuplului rezistent, pînă cînd devine egală cu frecvența curentului de măsurat și deci plăcuța intră în rezonanță mecanică și oscilează cu amplitudine maximă (mărind sensibilitatea galvanometrului).

Spotul luminos reflectat de oglinda galvanometrului descrie pe rigla gradată o bandă luminoasă, a cărei lățime este proporțională cu valoarea maximă a curentului alternativ de măsurat.

Galvanometrele de rezonanță cu plăcuță mobilă magnetizată se construiesc pentru frecvențe de 25—100 Hz sau 400—1 000 Hz și au o sensibilitate de ordinul 10^8 mm/A.

Galvanometrul de rezonanță cu magnet mobil este asemănător cu cel precedent, cu deosebirea că fluxul magnetic continuu este creat de un magnet permanent, (de dimensiuni foarte mici) suspendat pe benzi tensionate între polii unui electromagnet ceea ce exclude necesitatea sursei de curent continuu. Sensibilitatea sa este însă mai redusă (10^6 — 10^7 mm/A) și gama de frecvențe mai restrînsă de obicei (40—60 Hz).

Galvanometrul magnetoelectric de rezonanță cu bobină mobilă are o construcție similară cu aceea a unui galvanometru de curent continuu. Bobina sa mobilă are o formă alungită și îngustă, fără cadru, ceea ce face ca să aibă un moment de inerție foarte mic.

B. MĂSURAREA CURENȚILOR ȘI TENSIUNILOR CU AJUTORUL AMPERMETRELOR ȘI VOLTMETRELOR

În circuitele de curent continuu și de curent alternativ curenții care depășesc 10^{-6} A se măsoară cu ajutorul ampermetrelor, iar tensiunile mai mari de 10^{-4} V cu voltmetre. Ampermetrele se leagă în circuitele de măsurare în serie (fig. 3-6,a și b), iar voltmetrele în paralel cu punctele între care se măsoară tensiunea (fig. 3-6,c și d). În funcție de valoarea curentului sau a tensiunii de măsurat ampermetrele se conectează în circuit direct (fig. 3-6,a) sau în paralel cu un șunt (fig. 3-6,b), iar voltmetrele direct (fig. 3-6,c)

sau în serie cu o rezistență adițională (fig. 3-6,d). Legarea directă în circuit a ampermetrelor și voltmetrelor este posibilă numai dacă curentul de măsurat poate trece integral prin dispozitivul de măsurat fără să-l deterioreze.

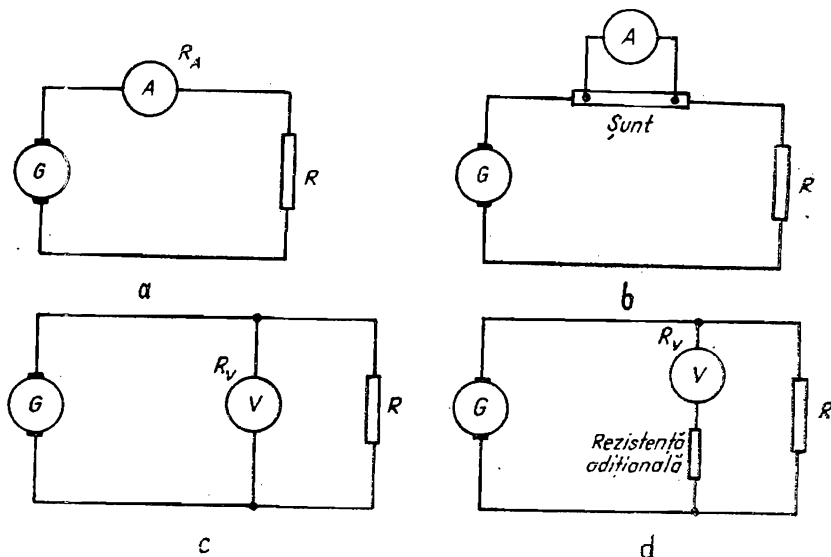


Fig. 3—6. Schemele de legare în circuit a ampermetrelor și voltmetrelor.

Curenții și tensiunile foarte mari se măsoară cu ampermetrele și voltmetrele prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

Prin conectarea lor în circuitele de măsurare ampermetrele și voltmetrele datorită consumului propriu de putere, modifică regimul de lucru al circuitelor și ca urmare valoarea mărimii de măsurat, introducând astfel o eroare sistematică de metodă. Între valoarea mărimii indicate de aparatele de măsurat și cea adevărată, care exista înainte de conectarea acestora în circuitul de măsurare, există o diferență determinată de faptul că rezistența ampermetrelor nu este egală cu zero și rezistența voltmetrelor nu este infinită. Această diferență este cu atât mai mare cu cât consumul de putere al aparatelor de măsurat este mai mare în comparație cu puterea din circuitul în care se face măsurarea.

Pentru ca influența consumului aparatelor de măsurat și ca urmare eroarea sistematică de metodă să fie cât mai mici, rezistența ampermetrelor trebuie să fie cât mai mică, iar rezistența voltmetrelor cât mai mare în comparație cu rezistența circuitului de măsurare.

Ca ampermetru sau ca voltmetru poate fi folosită oricare din dispozitivele de măsurat, cu excepția dispozitivelor electrostatice care nu pot fi folosite decât ca voltmetre.

Într-adevăr, deoarece deviația sistemului mobil este funcție de curentul I care trece prin dispozitivul de măsurat, $\alpha = f(I)$, dacă aparatul este conectat

ca voltmetru și dacă rezistența sa R_v este constantă, curentul prin dispozitivul de măsurat depinde numai de tensiunea U_x de măsurat:

$$I = I_v = \frac{U_x}{R_v} = f_1(U_x). \quad (3-9)$$

Deviația sistemului mobil este deci:

$$\alpha = f(I) = f[f_1(U_x)] = f_2(U_x). \quad (3-10)$$

Așadar ampermetrele și voltmetrele au dispozitivele de măsurat de aceeași construcție, deosebindu-se doar prin parametri, schema interioară și modul de legare la circuitul de măsurare.

Curenții și tensiunile continue se măsoară cu aparate magnetoelectrice și electrodinamice. Tensiunile peste 1 000 V (pînă la 10 kV și chiar mai mult) se măsoară cu voltmetre electrostatice.

Curenții și tensiunile alternative se măsoară cu aparate diferite după valoarea mărimii de măsurat. Curenții și tensiunile mici (de ordinul miliamperilor și amperilor și a milivolților și volților) se măsoară, în general, cu aparate magnetoelectrice cu redresor sau cu termocuplu. Curenții de ordinul amperilor și zecilor de amperi (pînă la circa 80–100 A) și tensiunile de ordinul zecilor și sutelor de volți (pînă la circa 600–750 V) se măsoară cu aparate feromagnetice, electrodinamice și termice cu fir cald. Curenții de intensități mari (peste 100 A) se măsoară prin intermediul transformatoarelor de măsurat care reduc de obicei curentul de măsurat la 5 A sau în anumite cazuri la 1 A. Tensiunile înalte (peste 750 V) se măsoară cu ajutorul transformatoarelor de măsurat sau cu voltmetre electrostatice. Transformatoarele de măsurat se folosesc în general pentru măsurări de tensiuni pînă la 100 kV. Peste această tensiune măsurările cu transformatoare devin costisitoare și de aceea este indicată folosirea voltmetrelor electrostatice.

1. AMPERMETRE ȘI VOLTMETRE MAGNETOELECTRICE

Ampermetrele și voltmetrele magnetoelectrice sînt cele mai precise și mai sensibile aparate de măsurat indicatoare. Ele se fabrică ca aparate de laborator de clasa 0,1–0,2–0,5, iar ca aparate tehnice de clasa 1 și 1,5. Consumul propriu de putere al acestor aparate este mai mic decît al celorlalte tipuri: la ampermetre circa 45–75 mW/A, iar la voltmetre circa 3 mW/V.

Aparatele magnetoelectrice se utilizează fără șunturi sau rezistențe adiționale la măsurarea curenților foarte mici, pînă la 30–50 mA, cu o cădere de tensiune de ordinul 60–150 mV, numindu-se în aceste cazuri *miliampermetre-milivoltmetre*. Pentru măsurarea curenților de la cîțiva miliamperi pînă la 30 000 A și a tensiunilor pînă la 1 000 V, aparatele magnetoelectrice se folosesc împreună cu șunturi, respectiv cu rezistențe adiționale, constituind ampermetrele și voltmetrele magnetoelectrice.

Șunturile și rezistențele adiționale se construiesc pentru unul sau mai multe domenii de măsurare, interioare (până la 50—100 A, respectiv 600—750 V) sau exterioare aparatului, individuale sau calibrate.

Influența temperaturii mediului înconjurător este principala sursă de erori a aparatelor magnetoelectrice, în special prin modificarea rezistenței

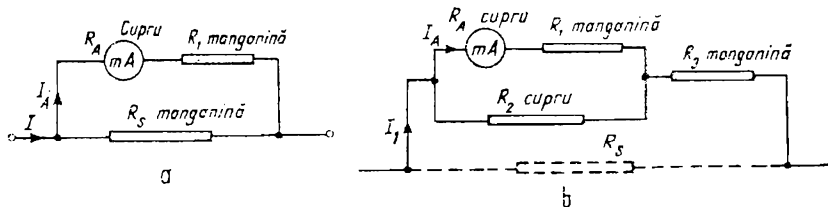


Fig. 3—7. Scheme de compensare a erorii de temperatură la ampermetrele magnetoelectrice.

înfășurărilor. La miliampermetre și voltmetre această influență este neglijabilă deoarece intensitatea curentului prin dispozitivul de măsurat este determinată de rezistența circuitului exterior, respectiv a rezistenței adiționale care practic este invariabilă cu temperatura.

Indicațiile ampermetrelor cu șunt depind însă foarte mult de variația temperaturii mediului înconjurător. Curentul de măsurat se distribuie în cele două circuite în paralel — al bobinei mobile și al șuntului — invers proporțional cu rezistența lor. Rezistența șuntului din manganină nu variază practic cu temperatura, pe când rezistența bobinei din cupru se modifică destul de mult (se mărește cu 4% pentru fiecare 10 grade creștere de temperatură), ceea ce duce la o redistribuire a curenților, indicațiile aparatului devenind inexacte. Pentru micșorarea erorii suplimentare de indicație se folosesc diferite scheme de compensație.

Pentru ampermetrele de precizie redusă (clasa 1 și 1,5) se utilizează schema din figura 3-7, *a*, în care se leagă în serie cu bobina mobilă a aparatului, de rezistență R_A , o rezistență de compensație R_1 din manganină.

Pentru aparatele mai precise în locul acestei scheme se folosește schema de compensare serie-paralel din figura 3-7, *b*. În această schemă bobina mobilă R_A în serie cu rezistența R_1 din manganină sînt legate în paralel cu o rezistență R_2 din cupru, întregul ansamblu fiind conectat în serie cu o rezistență adițională R_3 din manganină.

2. AMPERMETRE ȘI VOLTMETRE MAGNETOELECTRICE CU REDRESOARE

Aparatele magnetoelectrice caracterizîndu-se printr-o mare sensibilitate și precizie și printr-un consum de putere foarte mic, calități pe care nu le au celelalte tipuri de aparate de măsurat electrice, se folosesc din ce în ce mai mult și la măsurări în curent alternativ, în asociație cu un dispozitiv redresor.

După dispozitivul redresor cu care se asociază aparatul magnetoelectric se deosebesc: aparate cu redresoare, aparate cu termocuplu, aparate electronice.

Aparatele cu redresor constau dintr-un aparat magnetoelectric și unul sau mai multe redresoare cu semiconductoare (diode cu germaniu, cu siliciu sau cu cuproxid).

a) **Elementele redresoare semiconductoare** sînt elemente conductoare neliniare; curentul care le străbate este funcție de valoarea și sensul tensiunii aplicate, datorită variației rezistenței interne cu tensiunea aplicată. Ca urmare caracteristica lor statică curent-tensiune este neliniară (fig. 3-8).

După sensul tensiunii aplicate elementul redresor lasă curentul să treacă ușor într-un sens și foarte greu în celălalt. Rezistența internă a elementului redresor în direcția trecerii ușoare a curentului este foarte mică și se numește *rezistență directă* R_d , iar cea în sens contrar este foarte mare și se numește *rezistență inversă* R_i . Curentul care trece prin elementul redresor în sensul rezistenței directe are o valoare mare și se numește *curent direct* I_d , iar cel în sensul rezistenței inverse este foarte mic, practic zero, și se numește *curent invers* I_i . În mod analog tensiunea aplicată se numește *tensiune directă* U_d și *tensiune inversă* U_i . Peste o anumită valoare a tensiunii inverse, denumită *tensiune de străpungere*, elementul redresor își pierde proprietatea de redresare, curentul invers crescînd brusc. Tensiunea maximă care se redresează trebuie să fie mai mică decît tensiunea de străpungere.

Raportul dintre curentul direct I_d și cel invers I_i caracterizează din punct de vedere calitativ elementele redresoare; el se numește *coeficient de redresare* K :

$$K = \frac{I_d}{I_i} = \frac{R_i}{R_d}. \quad (3-11)$$

Un redresor perfect ar fi acela care ar avea rezistența inversă infinită și rezistența directă egală cu zero, și deci un coeficient de redresare infinit. În realitate, rezistența directă nu poate fi nulă și nici rezistența inversă nu este infinită, așa încît coeficientul de redresare are valori finite foarte mari.

Coeficientul de redresare nu este constant, ci variază cu tensiunea și temperatura de lucru, din cauza variației rezistenței interne a elementelor redresoare.

Ca elemente redresoare se folosesc diodele semiconductoare cu germaniu, cu siliciu sau cu cuproxid.

Diodele cu germaniu (fig. 3-9, a) constau dintr-un cristal de germaniu 1 cu conductivitate de tip n , fixat pe un soclu metalic 2 așezat la unul din ca-

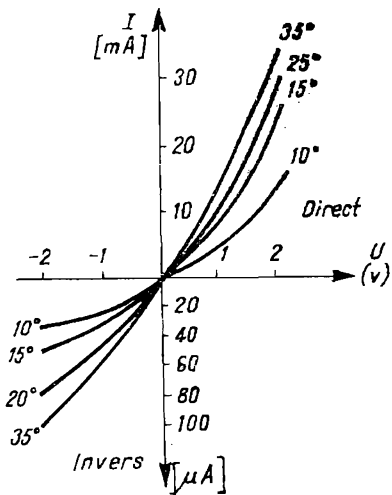


Fig. 3—8. Caracteristica statică: curent-tensiune a diodelor semiconductoare cu cuproxid.

petele unui tub de porțelan 3. Pe cristal se sprijină vârful ascuțit al unui conductor elastic de wolfram 4, care este prins la capătul celălalt al tubului de soclul 5. În procesul de formare inițială a diodei, trecându-se un impuls de curent, în jurul zonei de contact dintre cristalele de germaniu și firul de wolfram se formează un punct (aproximativ 10^{-4} mm²) de conductibilitate de tip *p*, realizându-se astfel o joncțiune *pn*. Sensul de conducție este de la punctul de conductivitate de tip *p* la cristalele de conductivitate de tip *n* când punctului îi este aplicat potențialul pozitiv.

Elementul redresor cu cuproxid (fig. 3-9, *b*) este constituit dintr-un strat subțire 1 de oxid cupros (Cu_2O), de conductivitate de tip *p*, aplicat pe o placă de cupru 2 cu care formează o joncțiune *pn* cu proprietăți redresoare. Pe stratul semiconductor este fixată o placă de plumb 3 care repartizează curentul pe toată suprafața și servește în același timp la răcire. Sensul de conducție este de la stratul de oxid cupros către placa de cupru.

Coeficientul de redresare al diodelor cu germaniu are valori de ordinul 4 000–6 000, al diodelor cu siliciu 10^5 – 10^6 , iar elementelor cu cuproxid 600–1 000.

b) Circuitele redresoare sînt alcătuite din unul sau mai multe elemente redresoare legate între ele în diferite moduri, în scopul de a transforma curentul alternativ în curent redresat, pulsatoriu. După numărul alternanțelor curentului alternativ redresat se deosebesc circuitele redresoare cu simplă redresare (fig. 3-10) și circuitele redresoare cu dublă redresare (fig. 3-11).

Circuitele redresoare cu simplă redresare folosesc unul sau două redresoare. Cel mai simplu circuit redresor constă dintr-un redresor legat în serie cu aparatul de măsurat (fig. 3-10, *a*). Redresorul permite trecerea curentului într-un singur sens numai în cursul unei singure semiperioade, astfel încît

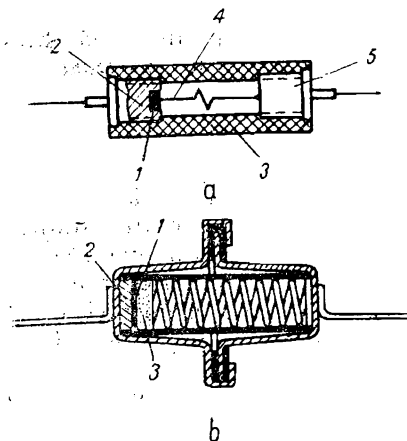


Fig. 3-9. Diodele semiconductor: *a* - cu germaniu; *b* - cu cuproxid.

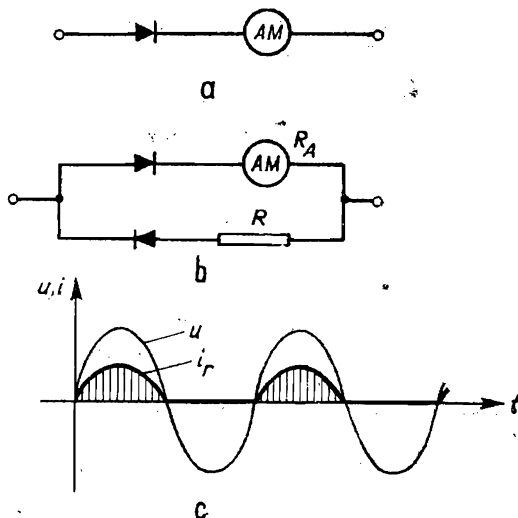


Fig. 3-10. Circuite redresoare cu simplă redresare.

prin aparatul de măsurat AM circulează un curent pulsatoriu (fig. 3-10, c). La schimbarea sensului curentului aproape întreaga tensiune a rețelei se aplică la bornele redresorului, ceea ce poate duce la străpungerea sa. Pentru limitarea tensiunii inverse și pentru a asigura continuitatea circulației curentului în circuit se utilizează încă un redresor care se montează cu polaritatea inversă în paralel cu ansamblul primului redresor și al aparatului de măsurat (fig. 3-10, b). În serie cu cel de-al doilea redresor se leagă o rezistență R egală cu rezistența R_A a aparatului de măsurat, care servește la egalizarea rezistențelor din cele două ramuri în paralel.

Pentru netezirea pulsațiilor curentului redresat, în paralel cu aparatul de măsurat se conectează un condensator de capacitate mare.

Circuitele redresoare cu dublă redresare redresează ambele alternanțe ale curentului alternativ, mărind astfel la dublu valoarea curentului redresat (pentru curenți sinusoidali $I_r = 0,9 I$). Cele mai folosite circuite cu dublă redresare sînt *circuitul cu transformator cu priză mediană* (fig. 3-11, a) și *circuitele în punte* (fig. 3-11, b și c). În aceste circuite redresoarele sînt astfel legate încît pentru ambele direcții ale curentului alternativ, curentul redresat circulează prin aparatul de măsurat AM în același sens (fig. 3-11, d). *Circuitele redresoare în punte cu două redresoare și două rezistențe* (fig. 3-11, c) au calitatea de a fi mai puțin influențate de variațiile temperaturii ambiante, însă necesită aparate de măsurat mai sensibile deoarece prin acestea nu trece decît o parte (30—40%) din curentul redresat, în fiecare semiperioadă una din rezistențe servind drept șunt.

Redresoarele din circuitele redresoare în punte sînt supuse unei tensiuni inverse de valoare jumătate cît tensiunea aplicată circuitului, deoarece sînt legate cîte două în serie.

Și la circuitele redresoare cu dublă redresare se conectează în paralel cu aparatul de măsurat un condensator de capacitate pentru netezirea pulsațiilor curentului redresat.

În funcție de schemele de redresare folosite, deci de numărul alternanțelor redresate se deosebesc aparate cu simplă redresare și aparate cu dublă redresare. Aparatele cu simplă redresare se folosesc rar, deoarece curentul trecînd numai în cursul unei singure alternanțe prin dispozitivul de măsurat, cuplul activ și deci sensibilitatea sînt mici.

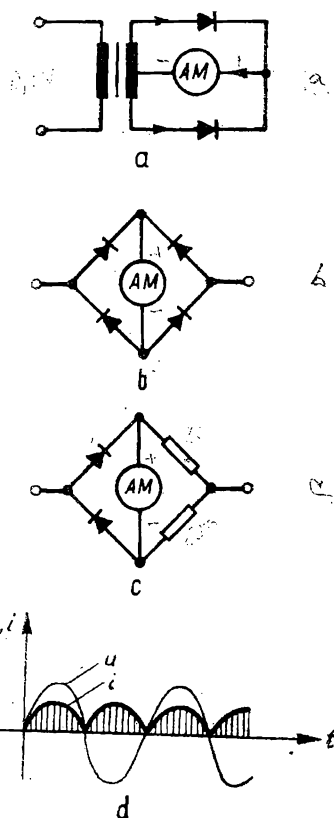


Fig. 3-11. Circuite redresoare cu dublă redresare.

Curentul redresat care trece prin dispozitivul de măsurat al aparatelor cu redresor este pulsatoriu și ca urmare și cuplul activ creat de el este pulsatoriu. Din cauza inerției, sistemul mobil nu reușește să urmărească variațiile cuplului activ pulsatoriu și rămîne într-o poziție medie, corespunzătoare valorii medii a cuplului.

Ca urmare ecuația scării (v. relația 2-18) dispozitivului de măsurat magnetoelectric în acest caz devine:

$$\alpha = \frac{BSn}{D} I_{med}. \quad (3-12)$$

Din această relație rezultă că indicațiile aparatelor cu redresoare sînt proporționale cu *valoarea medie* a curentului alternativ. În circuitele de curent alternativ însă este necesar în mod obișnuit să se măsoare valoarea eficace a curentului. Aparatele cu redresoare pot fi gradate pentru valorile eficace ale curentului numai pentru o formă determinată a curbei acestuia (în mod obișnuit, pentru sinusoidală). La schimbarea formei curbei curentului de măsurat apare o eroare suplimentară; mărimea acestei erori depinde de abaterea factorului de formă a curentului nesinusoidal față de valoarea 1,11 a acestui factor în curent sinusoidal.

Aparatele cu redresoare se folosesc la măsurarea curenților și tensiunilor în asociație cu șunturi sau rezistențe adiționale, la fel ca și aparatele magnetoelectrice. Rezistențele adiționale și șunturile se leagă în circuitul de curent alternativ și nu în cel de curent redresat, pentru a nu reduce valoarea tensiunii sau curentului aplicate elementelor redresoare. Schemele ampermetrelor și voltmetrelor cu redresoare sînt astfel realizate încît asigură în același timp extinderea limitei de măsurare cît și compensarea erorilor de temperatură și de frecvență (fig. 3-12).

Aparatele cu redresoare se construiesc în general ca aparate universale cu mai multe limite de măsurare pentru măsurarea curenților și tensiunilor atît în curent continuu cît și în curent alternativ. Aceste aparate se numesc *voltampermetre*.

Există multe construcții de aparate universale cu redresoare, diferind ca domenii de măsurare și performanțe. În figura 3-13 sînt reprezentate schema și aspectul exterior ale unui voltampermetru cu șase limite de măsurare pentru curenți (între 3 mA și 6 A) și tensiuni (între 6 V și 600 V).

Aparatele cu redresoare se utilizează mai ales ca aparate industriale portative. Precizia ampermetrelor și voltmetrelor cu redresoare este relativ mică, de obicei fiind de clasa 1,5 și 2,5 datorită numeroaselor surse de erori.

3. AMPERMETRE ȘI VOLTMETRE CU TERMOCUPLU

Aparatele cu termocuplu sînt constituite dintr-un dispozitiv de măsurat magnetoelectric și unul sau mai multe termocupluri.

Termocuplul este format din două conductoare din metale sau aliaje diferite, sudate la unul din capete. Prin încălzirea capătului activ (cu sudură)

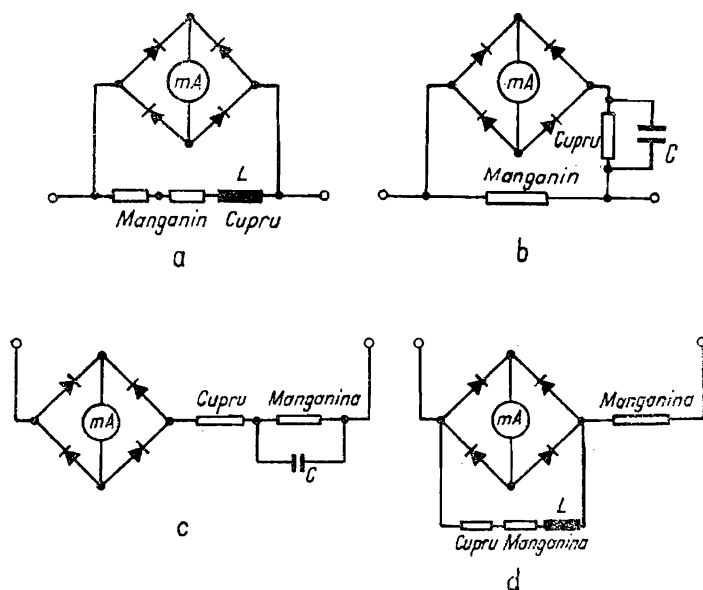


Fig. 3—12. Schemele aparatelor cu redresoare:

a — ampermetre pentru curenți mici; *b* — ampermetre pentru curenți mari; *c* — voltmetre pentru tensiuni mici; *d* — voltmetre pentru tensiuni mari.

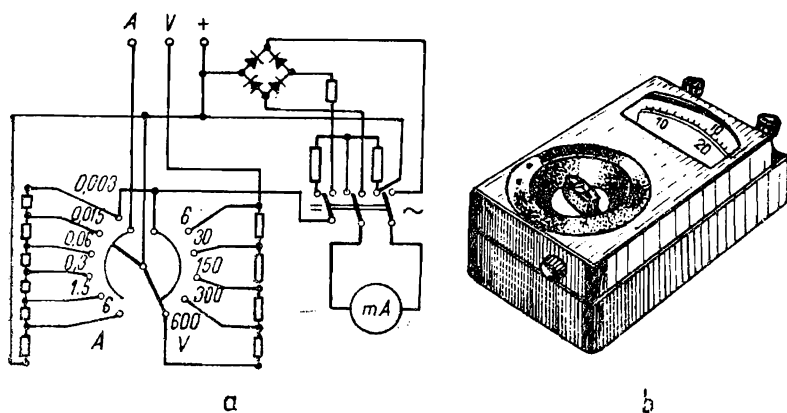


Fig. 3—13. Aparat universal cu redresor.

al termocuplului cu ajutorul curentului de măsurat, între capetele libere apare o forță termoelectromotoare. Dispozitivul magnetoelectric, fiind legat la capetele libere ale termocuplului, măsoară curentul datorit acestei forțe termoelectromotoare. Forța termoelectromotoare dezvoltată de termocuplu este proporțională cu diferența dintre temperatura capătului activ și cea a capătului liber. La rândul ei, această diferență de temperatură este proporțională cu cantitatea de căldură produsă de curentul de măsurat I pentru încălzirea capătului activ, adică cu $I^2 R_f$ (unde R_f este rezistența firului încălzitor prin care trece curentul de măsurat). Rezultă deci că indicațiile dispozitivului de măsurat sînt proporționale cu pătratul valorii eficace I a curentului de măsurat ($\alpha = kI^2$) și deci scara aparatului este pătratică.

Deoarece pe baza efectului termic al curentului electric se definește de fapt valoarea eficace a curenților alternativi, rezultă că aparatele cu termocuplu sînt utilizabile atît în curent continuu cît și în curent alternativ, indiferent de forma de variație în timp a acesteia.

Termocuplurile se execută din manganin-constantan (pentru încălziri pînă la 200°C), fier-constantan (pînă la 600°C), platină-platină-rhodium (pînă la 1 000°C) ș.a. Aceste termocupluri produc o forță termoelectromotoare de ordinul a 0,5 mV la o încălzire de 10 grade. Datorită acestei valori mici a forței termoelectromotoare este necesar să se folosească dispozitive de măsurat cu sensibilitate la tensiune mare. Firul încălzitor se confecționează din material nemagnetic de mare rezistență (constantan, cromnichel, aliaj de platină cu iridiu ș.a.).

După modul de încălzire a termocuplului, aparatele cu termocuplu sînt de două tipuri: cu contact și fără contact.

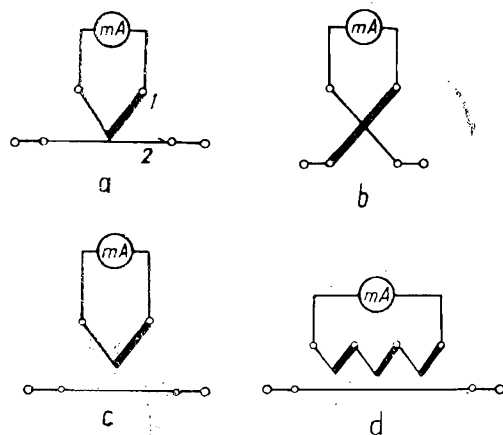


Fig. 3—14. Schema aparatelor cu termocuplu.

La *aparatele cu contact* (fig. 3-14, *a* și *b*) capătul activ al termocuplului 1 este sudat sau fixat de firul încălzitor 2 prin care trece curentul de măsurat, fiind încălzit prin contact direct de către acesta. Indicațiile aparatelor cu contact diferă într-o oarecare măsură după sensul curentului de măsurat, deoarece

capătul activ fiind în contact cu firul încălzitor, o parte din curentul de măsurat trece și prin termocuplu, adunându-se sau scăzându-se (în funcție de sens) la curentul produs de forța termoelectromotoare. Aceste aparate se folosesc pentru curenți de la 1 A la 300 A.

La *aparatele fără contact* (fig. 3-14, *c* și *d*) termocuplul nu este în contact cu firul încălzitor, acesta încălzind capătul activ prin radiație. Astfel sînt eliminate neajunsurile aparatelor cu contact, dar este necesară o energie termică mai mare, ceea ce duce la creșterea consumului propriu al aparatelor. Termocuplurile fără contact pot fi legate în serie (fig. 3-14, *d*), ceea ce permite mărirea forței termoelectromotoare; numărul termocuplurilor înseriate este limitat de creșterea rezistenței circuitului. Aparatele cu termocuplu fără contact se folosesc pentru curenți între 5 mA și 1 A.

La unele aparate nu se folosesc fire încălzitoare, încălzirea făcându-se chiar de către electrozii termocuplurilor legați direct în circuitul curentului de măsurat. Termocuplurile se montează în acest caz după o schemă în punte (fig. 3-15). În fiecare braț al punții sînt legate cîteva termocupluri a căror forță termoelectromotoare se adună. Rezistențele celor patru brațe ale punții sînt egale, astfel că puntea se găsește în echilibru și, ca urmare, curentul alternativ de măsurat nu trece prin dispozitivul de măsurat. Din aceeași cauză curentul continuu, produs de suma forțelor termoelectromotoare, nu se ramifică în circuitul alternativ. Pentru a se obține diferența de temperatură necesară între capetele active și libere ale termocuplurilor, capetele libere sînt legate la plăci masive din alamă sau cupru, care conduc bine căldura, iar capetele active rămîn în aer, adică într-un mediu rău conducător de căldură.

Aparatele cu termocuplu, pentru curenți mici (de la 1 mA pînă la 1 A) se construiesc cu termocuplul așezat în vid; în felul acesta se reduc foarte mult pierderile de căldură și ca urmare, temperatura și forța termoelectromotoare cresc. Aparatele cu termocuplu, pentru curenți mari (pînă la 150—300 A) în care se degajă multă căldură se construiesc cu termocuplul așezat în aer și au borne de legătură masive pentru a se evita supraîncălzirile.

Principala calitate a aparatelor cu termocuplu constă în faptul că indicațiile nu depind de frecvență pînă la frecvențe relativ înalte (2-5 MHz), ceea ce face ca ampermetrele cu termocuplu să fie cele mai utilizate în măsurările electronice (în special în domeniul frecvențelor radio). La frecvențe foarte înalte apar însă erori din cauza modificării rezistenței firului încălzitor datorită efectului pelicular. Deficiențele aparatelor cu termocuplu sînt: dependența indicațiilor de temperatura mediului înconjurător, sensibilitatea mare la suprasarcini, durată limitată de funcționare a termocuplurilor și necesitatea utilizării unui dispozitiv de măsurat de mare sensibilitate.

Aparatele cu termocuplu se construiesc în mod obișnuit ca aparate portative sau de tablou de clasa 1 — 2,5. Aceste aparate se utilizează mai ales

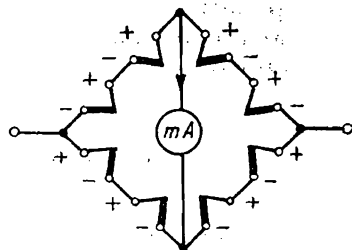


Fig. 3—15. Schema de punte a aparatelor cu termocuplu.

ca ampermetre și miliampermetre cu un singur domeniu de măsurare pentru măsurarea curenților de frecvență înaltă. Ca voltmetre se utilizează mai rar din cauza dificultăților de a realiza rezistențe adiționale nereactive.

4. AMPERMETRE ȘI VOLTMETRE FEROMAGNETICE

Datorită simplității și siguranței în funcționare, ampermetrele și voltmetrele feromagnetice sînt cele mai utilizate aparate de măsurat curenții și tensiunile alternative. În același timp se folosesc și pentru măsurarea curenților și tensiunilor continue. Ele se fabrică în general ca aparate de tablou de clasa 1,5—2,5, precum și ca aparate portative și de laborator, de clasa 0,2—0,5—1.

Ampermetrele feromagnetice se conectează în circuitul de măsurare direct, cu bobina dispozitivului de măsurat legată în serie, astfel că prin aceasta trece întreg curentul de măsurat. Bobina dispozitivului de măsurat fiind fixă poate fi construită pentru curenți nominali mari, astfel încît cu ampermetrele feromagnetice se pot măsura curenți pînă la 200—250 A fără să se utilizeze șunturi sau transformatoare de curent. Numărul de amperspire ale dispozitivului de măsurat este același pentru orice curent nominal (200—250 As); pentru aceasta bobinele ampermetrelor au spire cu atît mai puține cu cît curentul nominal este mai mare, ajungîndu-se ca la curenți de 200—250 A să aibă o singură spiră din bară de cupru. Pentru măsurarea curenților alternativi mari (peste 200 A), ampermetrele feromagnetice se folosesc împreună cu transformatoare de măsurat de curent. Extinderea domeniului de măsurare a ampermetrelor feromagnetice nu se face cu șunturi deoarece aceasta ar duce la creșterea consumului propriu al aparatelor (și așa destul de mare) prin necesitatea de a monta și rezistențe pentru compensarea erorii de temperatură și de frecvență.

Voltmetrele feromagnetice constau dintr-un miliampermetru feromagnetic conectat în serie cu una sau mai multe rezistențe adiționale, după cum aparatul are una sau mai multe limite de măsurare. Forța magnetomotoare a voltmetrelor feromagnetice fiind aceeași cu cea a ampermetrelor (200—250 As), însă curentul nominal fiind mult mai mic (0,025—0,1 A), bobinele voltmetrelor se construiesc cu un număr foarte mare de spire (2 000—10 000 spire).

Voltmetrele feromagnetice se construiesc pentru tensiuni nominale cuprinse între 15 V și 600 V. Pentru măsurarea tensiunilor peste 600 V, voltmetrele feromagnetice se folosesc împreună cu transformatoare de măsurat de tensiune.

Indicațiile ampermetrelor și voltmetrelor feromagnetice sînt influențate de temperatură, în curent continuu de histerezisul magnetic al pieselor magnetice, iar în curent alternativ de curenții turbionari și de frecvență.

Influența temperaturii ambiante asupra ampermetrelor feromagnetice este neînsemnată, deoarece curentul de măsurat trecînd integral prin bobina dispozitivului de măsurat, variația rezistenței acesteia cu temperatura nu atrage erori suplimentare. Indicațiile voltmetrelor sînt însă influențate de variația temperaturii ambiante, deoarece rezistența bobinei dispozitivului

de măsurat, confecționată din sîrmă subțire de cupru, constituie o parte însemnată din rezistența voltmetrului. Prin asigurarea unui anumit raport între rezistența bobinei și rezistența adițională această influență se compensează.

Influența frecvenței este mai importantă asupra voltmetrelor feromagnetice decît asupra ampermetrelor. Pentru compensarea erorii de frecvență se folosește un condensator C care șuntează o parte din rezistența adițională, micșorînd-o cu atît mai mult cu cît frecvența este mai mare și astfel impedanța întregului aparat variază într-o măsură mai mică.

Influența histerezisului magnetic și a curenților turbionari s-a redus simțitor prin folosirea materialelor feromagnetice cu inducție remanentă mică (permalloy) și a materialelor plastice. De asemenea, prin astaticizarea aparatelor s-a redus și influența cîmpurilor magnetice exterioare. În felul acesta, erorile ampermetrelor și voltmetrelor feromagnetice au scăzut mult, permițînd construirea de aparate cu precizie 0,5 și chiar 0,2.

Consumul propriu de putere al ampermetrelor și voltmetrelor feromagnetice este relativ ridicat: la ampermetre cu curențul nominal pînă la 10 A este de ordinul 0,5—2 W, iar la voltmetre variază între 3 W și 20 W (crescînd cu scăderea domeniului de măsurare).

5. AMPERMETRE ȘI VOLTMETRE ELECTRODINAMICE ȘI FERODINAMICE

Ampermetrele și voltmetrele electrodinamice sînt aparate de precizie mare, construindu-se de obicei ca aparate de laborator, de clasa 0,2 și 0,1. Aceste aparate se folosesc atît în curent continuu cît și în curent alternativ, indicațiile lor fiind identice, dacã se respectă anumite condiții în legătură cu raportul dintre rezistența și reactanța bobinelor. Aceasta permite ca aparatele electrodinamice să fie etalonate în curent continuu prin metoda de compensație, servind apoi ca aparate etalon în curent alternativ.

Ampermetrele și voltmetrele ferodinamice sînt mai puțin precise (clasa 1—2,5) decît cele electrodinamice, însă sînt mai robuste, fiind astfel utilizate mai ales ca aparate de tablou și aparate portative industriale.

Ampermetrele electrodinamice și ferodinamice au un domeniu larg de măsurare determinat de modul de conectare a bobinelor fixă și mobilă.

Ampermetrele pentru curenți mici, sub 0,5 A, se construiesc cu bobinele fixă și mobilă legate în serie (fig. 3-16, *a*), pentru aceste valori ale curențului fiind posibilă alimentarea bobinei mobile prin arcurile spirale. Pentru curenți mai mari conectarea bobinelor în serie nu mai este posibilă, deoarece arcurile spirale s-ar încălzi prea mult și ar căpăta deformări, iar bobina mobilă ar deveni prea grea și s-ar înrăutăți factorul de calitate al aparatului. De aceea ampermetrele, pentru curenți peste 0,5 A se construiesc cu bobinele legate

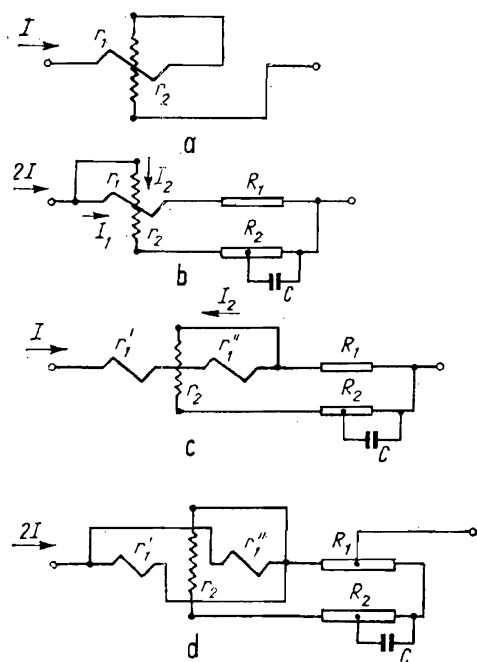


Fig. 3-16. Schemele de conexiuni ale bobinelor ampermetrelor electrodinamice.

și reactanțele celor două circuite în paralel se aleg astfel încât constantele de timp ale acestora să fie egale:

$$\frac{X_I}{R_I} = \frac{X_{II}}{R_{II}}, \quad (3-13)$$

unde R_I și R_{II} , X_I și X_{II} sînt rezistențele și respectiv reactanțele totale ale circuitelor în paralel. În acest scop se folosește și un condensator C care șuntează o parte din rezistența adițională.

Ampermetrele electrodinamice și ferdinamice se construiesc de obicei cu două limite de măsurare cu raportul 1 : 2. Ampermetrele electrodinamice se construiesc, în general, pentru curenți cuprinși între 25 mA și 10 A, mai rar pînă la 50 A. Pentru măsurarea curenților mai mari, ampermetrele electrodinamice se folosesc împreună cu transformatoare de măsurat de curent. Ampermetrele electrodinamice nu se utilizează cu șunturi din aceleași motive ca și ampermetrele feromagnetice.

Voltmetrele electrodinamice și ferdinamice au bobinele fixă și mobilă legate în serie, împreună cu o rezistență adițională cu ajutorul căreia se pot obține diferite domenii de măsurare (fig. 3-17). Scara gradată a voltmetrelor are același caracter ca și scara gradată a ampermetrelor.

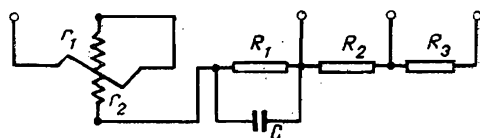
în paralel (fig. 3-16, b), sau cu bobina mobilă legată în paralel cu un șunt montat în serie cu bobina fixă (fig. 3-16, c și d).

Atît la legarea în serie cît și la legarea în paralel a bobinelor mobilă și fixă, indicațiile ampermetrelor sînt proporționale cu pătratul curentului de măsurat. Cum însă ampermetrele electrodinamice (ca și voltmetrele de altfel) se construiesc, în general, cu dispozitivul de măsurat cu cîmp magnetic uniform și cu unghiul inițial al bobinei mobile de $45^\circ - 55^\circ$, scara gradată a aparatelor nu este pătratică, ci aproape uniformă pe toată lungimea ei (cu excepția părții sale inițiale care este comprimată pînă la 20—25% din lungimea scării).

Pentru ca indicațiile ampermetrelor să fie aceleași atît în curent alternativ cît și în curent continuu trebuie ca curenții I_1 și I_2 să fie în fază ($\psi = 0$) și distribuția lor prin bobine să fie aceeași în ambele cazuri. Pentru aceasta, rezistențele

Voltmetrele electrodinamice și ferodinamice se construiesc de obicei cu mai multe limite de măsurare, cuprinse între 15 V și 600 V. Tensiunile mai mari de 600 V se măsoară cu voltmetrele electrodinamice prin intermediul transformatoarelor de măsurat de tensiune.

Fig. 3—17. Schema de conexiuni a voltmetrelor electrodinamice.



Indicațiile ampermetrelor și voltmetrelor electrodinamice și ferodinamice sînt influențate de cîmpurile magnetice exterioare (numai aparatele electrodinamice), de variația temperaturii ambiante și frecvența curentului măsurat. Influența cîmpurilor magnetice exterioare este eliminată prin ecranarea sau astaticizarea dispozitivului de măsurat.

Influența temperaturii asupra indicațiilor aparatelor electrodinamice și ferodinamice este diferită după schema lor de funcționare. La aparatele la care bobina fixă și cea mobilă sînt legate în serie, variația rezistenței bobinelor cu temperatura nu modifică practic curentul în circuit și deci nu schimbă indicațiile; o oarecare eroare o provoacă în acest caz numai variația elasticității arcurilor spirale cu temperatura. La aparatele la care bobina fixă și cea mobilă sînt legate în paralel, influența temperaturii se manifestă prin variația diferită a rezistențelor bobinelor, ceea ce duce la redistribuirea curenților. Pentru a împiedica aceasta, se montează în serie cu bobinele, rezistențe de compensație din manganină și cupru care egalizează coeficientul de temperatură în circuitele ambelor bobine.

Influența frecvenței este neglijabilă în cazul ampermetrelor cu bobinele legate în serie, care astfel pot fi utilizate pînă la frecvențe de ordinul 1500—2000 Hz. La ampermetrele cu bobinele legate în paralel eroarea de frecvență este mai mare datorită modificării valorii și fazei curenților prin circuitele legate în paralel din cauza variației cu frecvența a reactanței inductive a acestora. Eroarea de frecvență se elimină prin realizarea aceleiași condiții constructive $\left(\frac{X_I}{R_I} = \frac{X_{II}}{R_{II}}\right)$, care trebuie îndeplinită pentru ca indicațiile aparatelor să fie aceleași atît în curent continuu cît și alternativ. La voltmetre, în special la cele pentru tensiuni mici, influența variației este mai importantă din cauză că reactanța inductivă a bobinei aparatului este mai mare. Pentru reducerea erorii de frecvență, atît la voltmetre cît și la ampermetre se folosește un condensator care șuntează o parte din rezistența adițională și compensează inductivitatea circuitului.

Consumul propriu de putere al ampermetrelor și voltmetrelor electrodinamice este relativ ridicat: la ampermetrele pentru curenții nominali de la 0,5 A la 10 A este de ordinul 3-15 W, iar la voltmetrele pentru 150—300 V variază între 10 W și 20 W.

6. VOLTMETRE ELECTROSTATICE

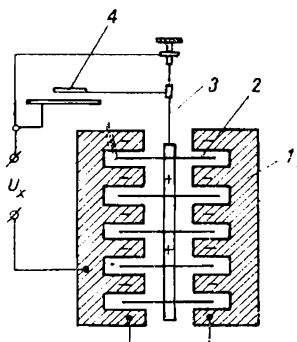


Fig. 3—18. Voltmetru electrostatic multicelular ecranat:

1 — plăci fixe; 2 — plăci mobile;
3 — fir de suspensie purtând acul indicator sau oglinda; 4 — acul indicator.

Voltmetrele electrostatice se construiesc pentru măsurarea tensiunilor joase și a tensiunilor înalte. Dispozitivele de măsurat electrostatice cu suprafața activă a armăturilor variabilă se folosesc de obicei pentru măsurarea tensiunilor joase (între 20 și 1 500 V), iar cele cu distanța dintre armături variabilă se folosesc pentru măsurarea tensiunilor înalte (pînă la 30 kV).

Limita inferioară de măsurare a voltmetrelor electrostatice este determinată de cuplul rezistent; la valori mici ale tensiunii, valoarea forței electrostatice produsă este foarte mică și în consecință cuplul activ rămîne sub valoarea cea mai mică a cuplului rezistent. Limita superioară este determinată de, distanța dintre plăci, adică de posibilitatea de străpungere a spațiului izolat.

Limita inferioară a voltmetrelor electrostatice este 10 V, iar cea superioară ajunge pînă la 30 kV. În cazul cînd armăturile se introduc într-un dielectric (ulei sau gaz comprimat), limita de măsurare se poate extinde pînă la 150 ÷ 180 kV.

Pentru mărirea sensibilității aparatelor de măsurat electrostatice și prin urmare pentru folosirea lor la limite mai mici de măsurare, dispozitivele de măsurat electrostatice cu suprafața activă a armăturilor variabilă se construiesc cu mai multe perechi de plăci fixe, între care se mișcă plăcile mobile fixate pe un ax comun (fig. 3-18). În acest mod crește numărul condensatoarelor legate în paralel și deci capacitatea totală a sistemului, ceea ce duce la un cuplu activ mai puternic. Acest voltmetru poate măsura tensiuni cuprinse între 150 și 1 000 V.

Extinderea domeniului de măsurare al voltmetrelor electrostatice (pînă la 500 kV) se efectuează cu ajutorul condensatoarelor adiționale și divizoarelor de tensiune capacitive în curent alternativ și cu ajutorul divizoarelor de tensiune rezistive în curent continuu.

Condensatoarele adiționale se montează în serie cu voltmetrul electrostatic (fig. 3-19, a) astfel încît tensiunea de măsurat U se distribuie între voltmetru și condensator (considerînd că aceștia nu au pierderi în dielectric) invers proporțional cu capacitatea lor:

$$\frac{C_v}{C_a} = \frac{U_a}{U_v},$$

de unde rezultă că tensiunea măsurată $U = U_v + U_a$ este:

$$U = U_v \frac{C_a + C_v}{C_a}. \quad (3-14)$$

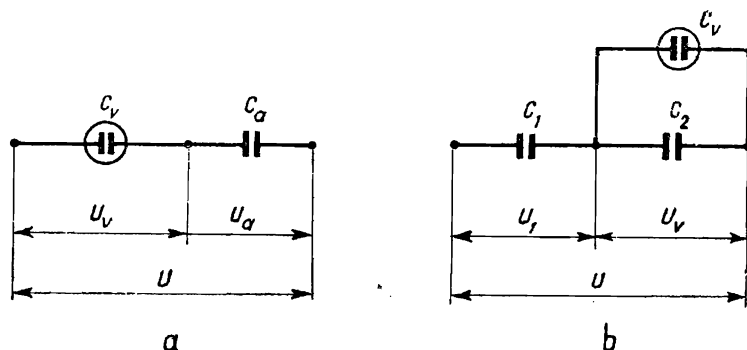


Fig. 3—19. Extinderea domeniului de măsurare a voltmetrelor electrostatice.

Capacitatea proprie C_v a voltmetrului variind cu deviația sistemului mobil, înseamnă că prin introducerea condensatorului adițional se modifică raportul $\frac{U}{U_v}$ și ca urmare aparatul trebuie să posede scară gradată pentru fiecare condensator adițional, adică pentru fiecare domeniu de măsurare.

Divizoarele de tensiune capacitive (fig. 3-19, b) sînt alcătuite dintr-un ansamblu de condensatoare montate în serie, pe unul dintre ele fiind legat în paralel voltmetrul electrostatic. În acest caz, considerînd că voltmetrul și condensatoarele divizorului nu au pierderi în dielectric, tensiunea de măsurat se repartizează invers proporțional cu capacitățile lor:

$$\frac{U_1}{U_v} = \frac{C_v + C_2}{C_1},$$

de unde rezultă că tensiunea măsurată $U = U_v + U_1$ este:

$$U = U_v \frac{C_v + C_1 + C_2}{C_1}. \quad (3-15)$$

Dacă capacitatea condensatorului C_1 este mult mai mare decît cea a voltmetrului C_v , atunci raportul $\frac{U}{U_v}$ rămîne practic constant pentru orice valoare a tensiunii de măsurat și astfel aparatul are o singură scară gradată pentru orice domeniu de măsurare.

Extinderea domeniului de măsurare în curent continuu cu ajutorul divizoarelor de tensiune rezistive este limitată, deoarece rezistențele folosite fiind foarte mari, curenții care trec prin voltmetrul electrostatic sînt foarte mici.

Indicațiile voltmetrelor electrostatice nu sînt influențate de temperatura ambiantă, de cîmpurile magnetice exterioare, de frecvența sau forma curbei tensiunii de măsurat. Doar cîmpurile electrice exterioare influențează funcți-

onarea dispozitivului de măsurat, deoarece câmpul electric propriu este relativ mic. Pentru micșorarea influenței acestora, dispozitivele de măsurat se ecranează electrostatic.

Consumul propriu de putere al voltmetrelor electrostatice este foarte redus, practic nul, datorită valorii mici a capacităților proprii (aproximativ 5-10 pF), fiind de ordinul $3 \cdot 10^{-3}$ VAR pentru o tensiune de 1 kV.

7. VOLTMETRE ELECTRONICE

Aparatele specifice folosite pentru măsurarea tensiunilor în circuitele electronice de audio și radiofrecvență sînt voltmetrele electronice.

Voltmetrele de acest tip sînt construite în principiu, dintr-un tub electronic detector, avînd în circuitul său un aparat magnetoelectric care măsoară curentul mediu anodic. Deoarece valoarea acestui curent depinde de valoarea medie a tensiunii alternative aplicate, aparatul poate fi etalonat direct în volți.

În prezent se construiesc un număr mare de tipuri de voltmetre electronice, care se deosebesc între ele după felul detecției, după regimul de funcționare, după schema interioară. După felul detecției se deosebesc voltmetre cu diodă, voltmetre cu triodă și detecție anodică și voltmetre cu triodă și detecție pe grilă.

a) **Voltmetre electronice cu diodă.** Voltmetrele electronice cu diodă se bazează pe proprietatea diodei de a conduce curentul într-un singur sens. Ele se compun, în principiu, dintr-o diodă conectată în serie cu aparatul de măsurat magnetoelectric (miliampermetru) — *voltmetre serie* (fig. 3-20, a și 3-21, a) — sau în derivație cu aparatul de măsurat magnetoelectric — *voltmetre derivație* (fig. 3-20, b și 3-21, b).

Voltmetrele cu diodă sînt de două feluri:

— în clasă B (fig. 3-20), la care, prin aparatul magnetoelectric, curentul trece în decursul unei singure semiperioade a curentului alternativ de măsurat;

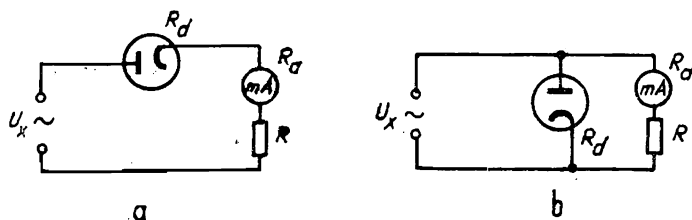


Fig. 3-20. Schema principală a voltmetrelor electronice cu diodă în clasă B.

— în clasa C (fig. 3-21), la care, prin aparatul magnetoelectric, curentul trece în cursul ambelor semiperioade ale curentului alternativ de măsurat.

— *Voltmetrele cu diodă în clasă B.* În figura 3-20, a este reprezentată schema principală a unui *voltmetru serie* în clasă B. Dacă la bornele U_x se

aplică tensiunea alternativă de măsurat, prin aparatul magnetoelectric mA curentul trece numai în semiperioadele în care anodul diodei are potențial pozitiv față de catod (alternanțele pozitive ale tensiunii U_x). Dacă amplitudinea tensiunii de măsurat este suficient de mare pentru ca dioda să funcționeze în regiunea liniară a caracteristicii sale și dacă rezistența R conectată în serie este mult mai mare decât rezistența internă R_d a diodei și R_a a aparatului de măsurat, atunci valoarea instantanee a curentului prin aparat este proporțională cu valoarea tensiunii de măsurat și aparatul magnetoelectric măsoară valoarea medie a acestei tensiuni pentru o semiperioadă, la fel ca în cazul aparatelor cu redresor.

În figura 3-20, *b* este reprezentată schema principală a unui *voltmetru derivație în clasă B*. Dacă rezistența R este mult mai mare decât rezistența diodei R_d , în alternanțele pozitive ale tensiunii U_x dioda conducând, scurtcircuitază dispozitivul de măsurat. Prin acesta curentul trece numai în alternanțele negative ale tensiunii U_x , cînd dioda nu conduce. Deci, și în acest caz, indicațiile aparatului sînt proporționale cu valoarea medie a tensiunii.

Voltmetrele derivației în clasă B nu se utilizează, deoarece în timpul alternanțelor pozitive dioda scurtcircuitază sursa de tensiune.

— Voltmetrele cu diodă în clasă C se deosebesc de cele în clasă B prin aceea că au un condensator introdus în circuitul de detecție.

În figura 3-21, *a* este reprezentată schema principală a *voltmetrului erie în clasă C*. În cursul alternanțelor pozitive, tubul conducînd, are loc

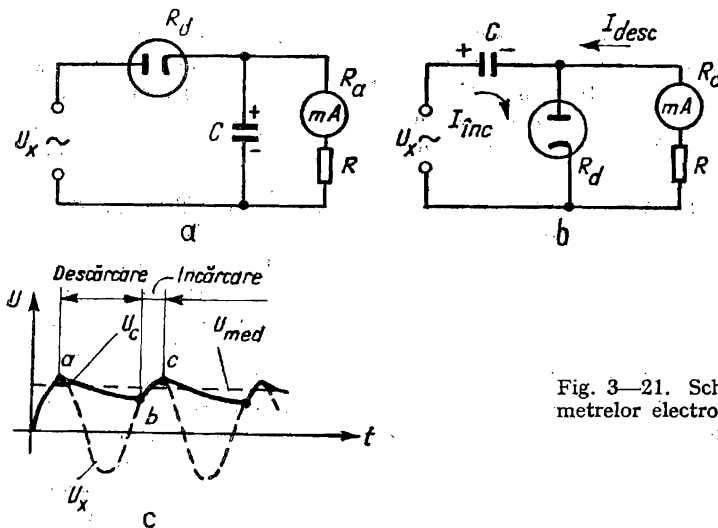


Fig. 3—21. Schema principală a voltmetrelor electronice cu diodă în clasă C.

încărcarea condensatorului C . Dacă rezistența R este mare în comparație cu rezistența diodei R_d , aproape întreaga tensiune de măsurat U_x se aplică la bornele ei și, în același timp, și la bornele condensatorului. Ca urmare, încăr-

carea condensatorului are loc pînă în momentul în care tensiunea U_x devine mai mică decît tensiunea U_c la bornele condensatorului, adică pînă la valoarea de vîrf a tensiunii de măsurat U_x (punctul a din figura 3-21, c). Din acest moment condensatorul se descarcă lent prin aparatul magnetoelectric și rezistența R . Cînd tensiunea U_x depășește tensiunea U_c (punctul b din figura 3-21, c) dioda se deschide și reîncepe încărcarea condensatorului pînă la valoarea de vîrf a tensiunii U_x , după care întregul proces se repetă.

Astfel, prin dispozitivul de măsurat trece curent în cursul ambelor alternanțe. Dacă constanta de timp RC a circuitului este mult mai mare decît perioada tensiunii măsurate U_x , tensiunea U_c la bornele condensatorului scade foarte puțin în timpul descărcării condensatorului; astfel, curentul continuu care trece prin aparatul magnetoelectric este practic proporțional cu valoarea de vîrf a tensiunii măsurate ($I_0 = kU_{x\max}$).

Voltmetrul derivație în clasă C (fig. 3-21, b) funcționează în modul următor: cît timp anodul diodei are potențial pozitiv față de catod și tensiunea de măsurat U_x depășește tensiunea la bornele condensatorului U_c , tubul conduce scurtcircuitînd dispozitivul de măsurat mA și rezistența R . În acest timp întreaga tensiune de măsurat se aplică condensatorului C , care se încarcă repede pînă la valoarea de vîrf a tensiunii U_x . Din momentul în care tensiunea U_x devine mai mică decît tensiunea U_c la bornele condensatorului, acesta se descarcă. Deoarece prin aceasta anodul diodei capătă un potențial negativ, curentul de descărcare I_{des} trece prin dispozitivul de măsurat și rezistența R . Cînd tensiunea U_x depășește tensiunea U_c , reîncepe încărcarea condensatorului pînă la valoarea de vîrf a tensiunii U_x , după care întregul proces se repetă.

Voltmetrele cu diodă în clasă C servesc deci la măsurarea tensiunii de vîrf. În cazul tensiunilor sinusoidale, la care există o relație precisă între valoarea eficace și cea de vîrf a tensiunii ($U = 0,707 U_{\max}$), aparatul poate fi etalonat și în valori eficace. În acest caz, etalonarea depinde de frecvență, voltmetrul neputînd fi utilizat, sub o anumită frecvență, care, de obicei, este de 20 Hz.

Dezavantajul voltmetrelor electronice cu diodă îl constituie curentul inițial I_{a0} care există în lipsa aplicării tensiunii alternative de măsurat pe anod, datorită faptului că unii electroni, plecînd din catod cu o viteză inițială mare, ajung pînă la anod. Acest curent (în general de ordinul 300—500 μA) produce devierea indicatorului aparatului de măsurat de la poziția de zero, în absența tensiunii de măsurat. Menținerea indicatorului la poziția de zero se obține prin compensarea curentului anodic inițial prin aparatul de măsurat. Pentru aceasta, în paralel cu aparatul de măsurat se montează o baterie suplimentară E_c (fig. 3-22, a), care face ca prin aparatul de măsurat să treacă un curent egal și de sens contrar cu curentul inițial I_{a0} . Intensitatea curentului se reglează cu ajutorul rezistenței variabile R_c . Această schemă prezintă neajunsul posibilității de dereglare a compensării datorită modificării curentului inițial cînd variază tensiunea de încălzire a filamentului, ceea ce impune un reglaj frecvent al curentului de compensare. Acest neajuns se înlătură folosind pentru compensarea curentului inițial al diodei, în locul bateriei suplimentare, o a doua diodă T_2 (fig. 3-22, b) identică cu prima,

montată astfel încît curentul său inițial să treacă prin aparatul de măsurat în sens contrar cu curentul inițial al diodei T_1 . Filamentele celor două diode se alimentează de la aceeași sursă de încălzire, eliminîndu-se astfel dereglările compensației datorită variației sursei de încălzire. Curentul inițial al diodei suplimentare se poate regla cu ajutorul rezistenței variabile R_c . Această schemă de compensare se realizează de obicei cu o dublă diodă, care înglobează într-un singur tub atît dioda detectoare cît și cea de compensare.

Tensiunile maxime ce se pot măsura cu voltmetrele electronice cu diode sînt de circa $200 \div 300\text{V}$.

b) Voltmetrele electronice cu triodă și detecție anodică.

Voltmetrele electronice cu detecție anodică se compun dintr-o triodă T (fig. 3-23) și un miliampermetru sau un microampermetru magnetoelectric mA conectat în circuitul anodic al triodei. Dacă se aplică un semnal alternativ pe grilă, în circuitul anodic are loc o detecție și curentul continuu anodic crește. Miliampermetrul magnetoelectric măsoară creșterea curentului mediu anodic, indicînd astfel valoarea tensiunii de măsurat aplicată pe grilă.

Trioda are negativare fixă, și punctul static de funcționare se găsește în porțiunea neliniară a curbei caracteristice $i_a = f(u_g)$. Negativarea fixă se obține fie de la o baterie E_g prin intermediul unui potențiometru R (fig. 3-23, *a*), fie automat cu ajutorul unei rezistențe R_n , montată în circuitul catodic (fig. 3-23, *b*). În cazul negativării automate, cînd crește tensiunea pe grila tubului, datorită tensiunii de măsurat aplicată, crește curentul anodic al tubului și se mărește astfel căderea de tensiune pe rezistența R_n , ceea ce provoacă la rîndul său creșterea negativării grilei; rezultă deci că între circuitul anodic și cel de grilă există o reacție negativă.

Funcționarea voltmetrelor cu detecție anodică depinde de regimul de funcționare ales. Negativarea se poate alege astfel încît tubul să funcționeze fie în clasa AB (fig. 3-23, *c*), fie în clasa B (fig. 3-23, *d*), fie în clasa C (fig. 3-23 *e*). În general, negativarea se ia cu circa 1,5-2 V mai mare decît amplitudinea tensiunii de măsurat.

La funcționarea în clasa AB curentul anodic trece prin circuit în cursul întregii perioade a tensiunii aplicate, deci sînt redresate ambele semipe-riode. Datorită caracteristicii neliniare $i_a = f(u_g)$, adică datorită pantei diferite pe care o are curba caracteristică de o parte și de alta a punctului static de funcționare, valoarea medie a curentului anodic este mai mare în timpul semiperioadelor negative, de aceea valoarea medie a curentului anodic

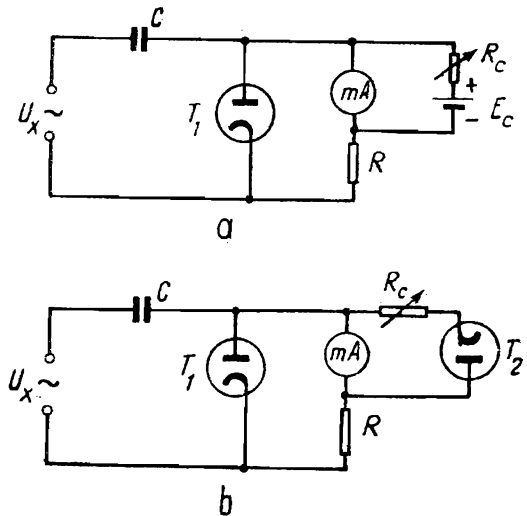


Fig. 3-22. Compensarea curentului inițial la voltmetrele electronice.

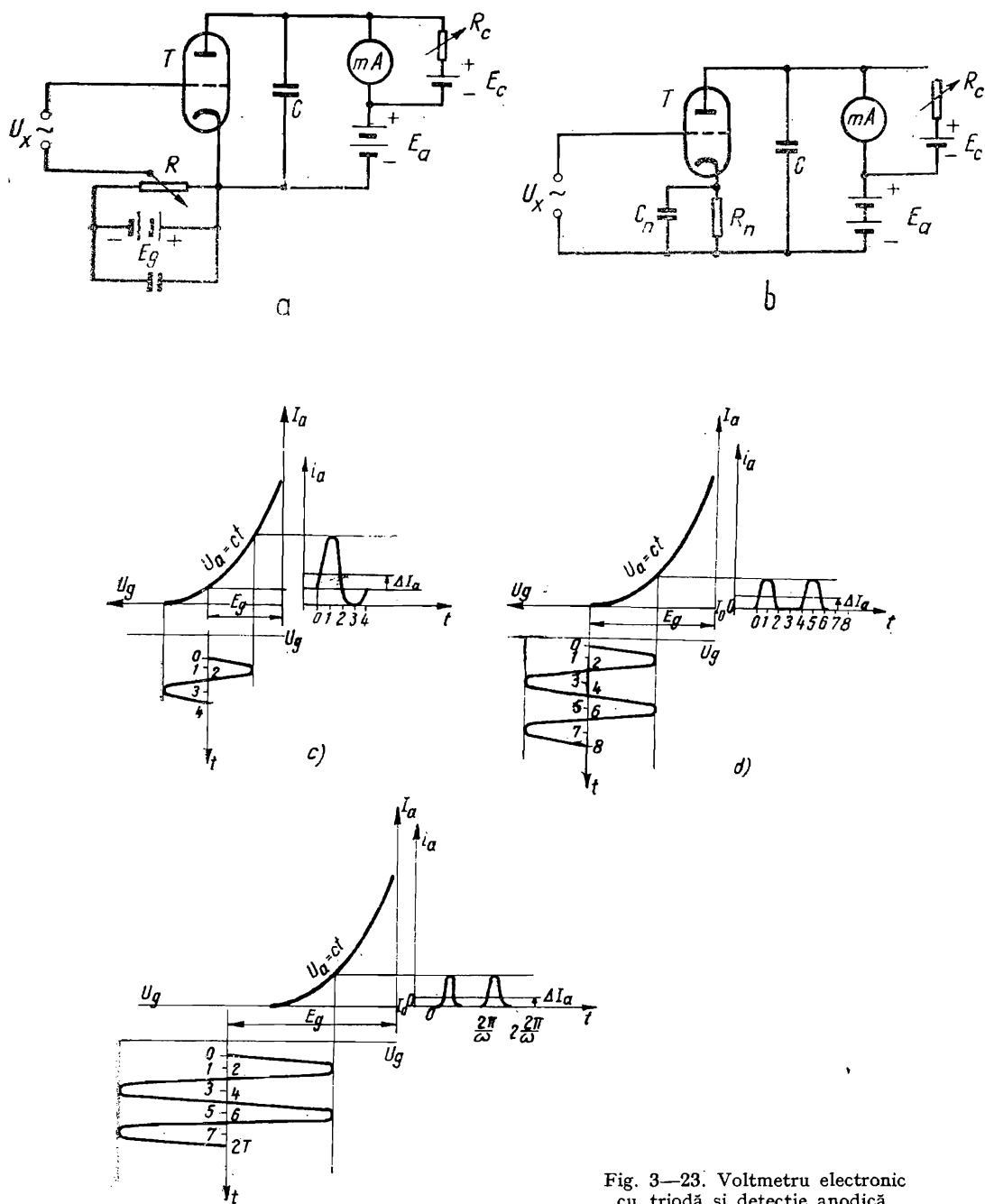


Fig. 3—23. Voltmetru electronic cu triodă și detecție anodică.

variază, în funcție de amplitudinea tensiunii aplicate la bornele de intrare, apărînd astfel fenomenul de redresare.

Creșterea curentului anodic mediu este cu atît mai mare cu cît amplitudinea semnalului aplicat pe grilă este mai mare. Aparatul de măsurat se poate deci etalona în valori ale tensiunii de măsurat.

În cazul funcționării în clasa AB, (fig. 3-23,c) curentul mediu anodic I_0 are o valoare destul de mare în lipsa tensiunii de măsurat. La funcționarea în clasa AB, caracteristica tubului în jurul punctului de funcționare, se consideră parabolică și indicația aparatului de măsurat este proporțională cu pătratul valorii eficace U_x a tensiunii de măsurat:

$$I = k \frac{U_{x\max}^2}{2} = kU_x^2$$

atît în cazul unui semnal de formă sinusoidală cît și în cazul unui semnal nesinusoidal, cu condiția ca forma curbei tensiunii ce se măsoară să rămînă invariabilă. Aparatul are deci scară pătratică (neuniformă) și măsoară valoarea eficace a tensiunii aplicate.

La funcționarea în clasă B (fig. 3-23,d) în cazul unor semnale de amplitudine mare și dacă curba caracteristică este cît mai liniară, curentul anodic trece prin circuit numai în timpul semiperioadei pozitive, iar în semiperioada negativă tubul este blocat și deci nu circulă curent. Aparatul de măsurat al voltmetrului indică în acest caz valoarea medie a semiperioadei pozitive $\frac{U_{x\max}}{\pi}$, scara gradată fiind liniară. Etalonarea se face totuși în valori eficace pentru tensiuni sinusoidale.

La fel ca și voltmetrele electronice cu diodă, voltmetrele cu detecție anodică sînt prevăzute cu circuite pentru compensarea curentului anodic inițial.

Voltmetrele electronice cu detecție anodică se utilizează pentru măsurarea tensiunilor de circa 1 V.

c) **Voltmetre electronice cu triodă și detecție pe grilă.** Voltmetrele electronice cu detecție pe grilă se compun dintr-o triodă T funcționînd cu detecție pe grilă (fig. 3-24) și un miliampermetru magnetoelectric mA montat în circuitul anodic al triodei.

După modul cum este conectat grupul de detecție RC la grila tubului, voltmetrele cu detecție pe grilă pot fi serie (fig. 3-24,a) sau derivație (fig. 3-24,b). Aceste voltmetre pot fi considerate ca fiind formate dintr-un voltmetru cu diodă în clasă C și un amplificator de curent continuu. Funcția de voltmetru este realizată de grupul de detecție RC și de circuitul grilă-catod.

Funcționarea acestor voltmetre este următoarea: în lipsa tensiunii U_x care trebuie măsurată, grila triodei are o negativare nulă ($U_g = 0$), prin circuitul anodic trecînd cu-

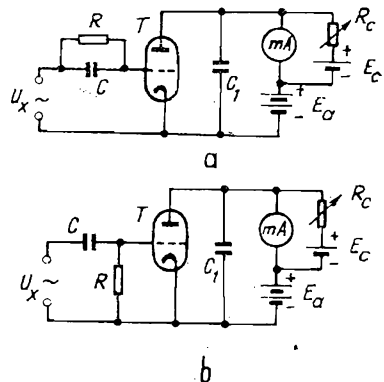


Fig. 3—24. Voltmetru electronic cu triodă și detecție pe grilă.

rentul de repaus. La aplicarea tensiunii de măsurat la bornele U_x , condensatorul C se încarcă pînă la valoarea de vîrf a tensiunii U_x . Tensiunea de încărcare a condensatorului se aplică pe grilă negativînd-o și, ca urmare, curentul anodic scade. Aparatul magnetoelectric măsoară diferența dintre curentul de repaus și acest curent.

Dacă capacitatea condensatorului C este mică și rezistența R foarte mare, punctul de funcționare al triodei rămîne pe porțiunea liniară a caracteristicii $i_a = f(u_g)$; tubul funcționează ca amplificator simplu și curentul mediu anodic I_a scade cu tensiunea medie de negativare. Indicațiile aparatului de măsurat sînt proporționale cu variația curentului anodic, deci cu amplitudinea (sau valorile de vîrf) tensiunii de măsurat U_x , obținîndu-se astfel un voltmetru cu scară gradată liniară.

Pentru a măsura numai variațiile curentului anodic, voltmetrele cu detecție pe grilă sînt prevăzute cu circuite pentru compensarea curentului anodic inițial.

Voltmetrele cu detecție pe grilă avînd și funcție de amplificare, sînt mai sensibile decît voltmetrele cu diodă sau decît voltmetrele cu triodă cu detecție anodică. În schimb însă, voltmetrele cu detecție pe grilă au o nestabilitate mai mare a etalonării, datorită modificării parametrilor tubului și schimbării punctului de zero la variația tensiunii de alimentare.

d) **Voltmetre electronice cu amplificator.** Voltmetrele electronice trebuie să aibă o rezistență de intrare cît mai mare. Pentru a se obține aceasta, în circuitul de detecție se utilizează rezistențe de sarcină cît mai mari (în special la voltmetrele cu diodă derivație în clasă C unde pentru aceeași rezistență de intrare rezistența de sarcină trebuie să fie de 1,5 ori mai mare decît la cele în serie). Ca urmare, curentul care trece prin circuitul de detecție este foarte mic, necesitînd astfel un aparat de măsurat de mare sensibilitate care este scump. De asemenea, nu se pot măsura tensiuni foarte mici (sub 1 V).

Pentru a se putea utiliza aparate de măsurat mai puțin sensibile și pentru a putea măsura tensiuni foarte mici, pînă la ordinul milivoltilor, voltmetrele electronice sînt asociate adesea cu un amplificator. După poziția amplificatorului față de circuitul de detecție, se deosebesc, voltmetre de tipul redresor-amplificator și voltmetre de tipul amplificator-redresor.

Voltmetrele de tipul redresor-amplificator. La acestea, tensiunea alternativă de măsurat este întîi redresată în circuitul de detecție (cu diodă), iar apoi este amplificată de către un amplificator de curent continuu. Amplificatorul de curent continuu este, de obicei, cu reacție negativă puternică (repetor catodic), care asigură o mare stabilitate a funcționării, independentă de tensiunea de alimentare.

Voltmetrele de tipul redresor-amplificator sînt mai puțin sensibile și mai puțin precise decît cele de tipul amplificator-redresor. Această caracteristică este determinată de faptul că circuitul de detecție nu poate lucra normal la tensiuni reduse (de aceea limita inferioară de măsurare a voltme-

trelor de tipul redresor-amplificator nu depășește 0,75—1,5 V). Calitatea voltmetrelor de tip redresor-amplificator este sensibilitatea independentă de frecvență pentru un domeniu întins de frecvență (de la 20—30 Hz pînă la 100—140 MHz). La voltmetrele de tip amplificator-redresor frecvența limită superioară depășește rareori 5 MHz, datorită dificultăților care apar la construcția amplificatorului.

În figura 3-25 este reprezentată schema unui voltmetru electronic de tip redresor-amplificator. Voltmetrul constă dintr-un circuit de detecție în clasă C, (cu dioda legată în derivație C_1 , T_1 , R_1) și un amplificator de curent continuu cu o triodă T_2 cu reacție negativă puternică, în circuitul catodic al căreia este conectat aparatul de măsurat mA . Între circuitul de detecție și intrarea amplificatorului este intercalat un filtru de netezire compus din condensatorul C_2 și rezistența R_2 , care elimină componenta alternativă a semnalului detectat, astfel încît pe grila tubului T_2 să se aplice numai componenta continuă a tensiunii. Rezistențele R_4 , R_5 , R_6 , R_3 și rezistența internă a tubului T_2 formează o punte electrică, avînd montat în una din diagonale aparatul de măsurat mA , iar în cealaltă diagonală sursa anodică E_a ; puntea servește la compensarea curentului inițial al tubului T_2 . Circuitul de detecție este montat într-o cutie separată mobilă, formînd așa-numitul cap de probă, și este legat de restul aparatului printr-un cordon flexibil.

În lipsa tensiunii de măsurat U_x puntea este echilibrată și prin aparatul de măsurat nu trece curent. Curentul inițial al tubului T_2 este compensat prin echilibrarea punții cu ajutorul rezistenței variabile R_3 . La aplicarea tensiunii de măsurat U_x , tensiunea continuă, obținută la bornele rezistenței de sarcină R_1 , care este aproximativ egală cu amplitudinea tensiunii sinusoidale sau cu valoarea de vîrf a unei tensiuni nesinusoidale, se aplică cu polaritatea minus pe grila tubului amplificator T_2 . Datorită negativării suplimentare a grilei tubului T_2 , curentul anodic al acestuia scade; ca urmare puntea se dezechilibrează, și prin aparatul de măsurat mA trece un curent. Acest curent și deci indicațiile aparatului sînt proporționale cu amplitudinea tensiunii de măsurat, deoarece curentul anodic scade cu creșterea acesteia.

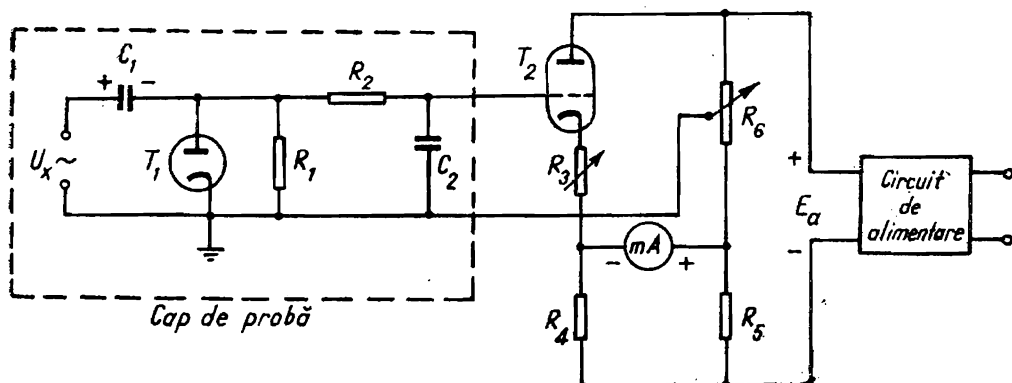


Fig. 3—25. Voltmetru electronic cu diodă și amplificator de curent continuu.

Variația maximă a curentului anodic este aproximativ egală cu curentul nominal al aparatului de măsurat, care nu este astfel supus unor curenți mai mari decât aceia pe care îi poate suporta.

Limita de măsurare a aparatului se schimbă cu ajutorul rezistenței R_6 ; când această rezistență crește, se mărește limita de măsurare.

Voltmetrele de tipul amplificator-redresor. La acestea tensiunea alternativă de măsurat este întâi amplificată de către un amplificator de curent alternativ, iar apoi redresată în circuitul de detecție. Aceste voltmetre pot măsura tensiuni foarte mici, de ordinul milivolților, constituind așa-numitele milivoltmetre electronice.

Amplificatorul de curent alternativ este de obicei de tip RC pentru frecvențe joase (audio) și cu circuit acordat (de rezonanță) pentru frecvențe înalte, avînd o puternică reacție negativă și o amplificare constantă într-o bandă de frecvențe cît mai largă.

e) **Proprietăți și utilizare.** Voltmetrele electronice prezintă față de celelalte tipuri de voltmetre o serie de proprietăți, ca: impedanță de intrare mare, posibilitatea de a fi folosite într-un domeniu de frecvențe foarte întins (de la 20–30 Hz pînă la sute de MHz), sensibilitate mare și consum foarte mic de putere.

Voltmetrele electronice au o precizie relativ mică (2,5–3%) și necesită surse proprii de alimentare.

C. MĂSURAREA CURENȚILOR ȘI A TENSIUNILOR PRIN METODE DE COMPENSAȚIE.

Curenții și tensiunile nu se pot măsura cu ajutorul ampermetrelor și voltmetrelor cu o precizie mai mare de $\pm 0,2\%$, datorită consumului propriu al aparatelor de măsurat. Aceste mărimi se măsoară cu o precizie foarte mare prin metode de compensație, care permit măsurarea fără consum de energie de la circuitul de măsurare. În acest caz erorile nu depășesc $+0,02\%$, în unele cazuri putînd fi și mai mici.

Cu ajutorul metodelor de compensație mărimea de măsurat este comparată nemijlocit cu măsurile fundamentale etalon ale mărimilor electrice. Astfel, la măsurarea forțelor electromotoare sau a tensiunilor, acestea se compară cu căderea de tensiune dintr-o rezistență de precizie cunoscută, creată de un curent auxiliar, care circulă prin această rezistență.

1. METODE DE COMPENSAȚIE

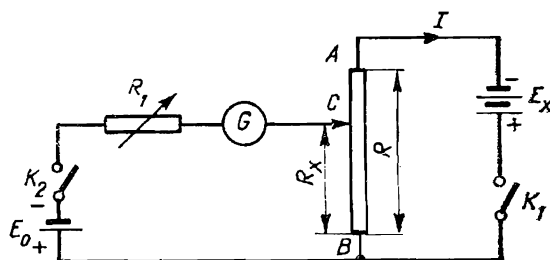
Metodele de compensație folosite pentru măsurarea forțelor electromotoare, a tensiunilor și a curenților în curent continuu sînt: metoda de opoziție simplă și metoda de opoziție prin substituție.

a) **Metoda de opoziție simplă.** În figura 3-26 este arătat montajul pentru măsurarea forței electromotoare prin metoda de opoziție simplă.

Montajul este format din două circuite: circuitul principal alcătuit din pila electrică E_x , a cărei forță electromotoare trebuie măsurată, legată în

serie cu rezistența de reglare R cu variație liniară, precis cunoscută (rezistență cu fir calibrat și cursor sau două cutii de rezistență complementare), un circuit de măsurare, alcătuit din elementul Weston E_0 , a cărui forță electromotoare este cunoscută precis, aparatul indicator de zero G , care de cele mai multe ori este un galvanometru cu magnet permanent, și rezistența de protecție R_1 , care servește la limitarea curentului, a cărui intensitate nu

Fig. 3—26. Metoda de compensație de opoziție simplă.



trebuie să depășească valoarea maximă admisibilă pentru elementul normal (circa 10^{-6} A) și pentru galvanometru. Pila electrică de măsurat și elementul Weston se montează în opoziție, pentru a se putea realiza echilibrul galvanometrului și pentru a evita suprasolicitarea elementului normal.

Măsurarea se efectuează în felul următor: la închiderea întrerupătorului K_1 se stabilește în circuitul principal al montajului un curent constant $I = \frac{E_x}{R}$ de ordinul $10^{-3} - 10^{-4}$ A. Închizînd apoi și întrerupătorul K_2 , se variază poziția cursorului C al rezistenței R pînă la obținerea echilibrului galvanometrului, corespunzînd unei rezistențe $BC = R_x$. În acest moment căderea de tensiune la bornele porțiunii de rezistență BC este egală cu forța electromotoare a elementului normal, adică prin circuitul de măsurare nu trece nici un curent:

$$E_0 = R_x I = R_x \frac{E_x}{R},$$

de unde:

$$E_x = E_0 \frac{R}{R_x} \quad (3-16)$$

Inconvenientul acestei metode constă în faptul că nu permite măsurare forțelor electromotoare în gol, întrucît acestea debitează în circuitul principal curentul I și astfel se măsoară diferența de potențial bornele sursei E_x . De asemenea, întrucît întotdeauna $R > R_x$, cu această metodă nu se pot măsura diferențele de potențial mai mici decît forța electromotoare a elementului normal E_0 .

b) **Metoda de opoziție prin substituție** înlătură inconvenientul metodei precedente. Montajul pentru măsurarea forțelor electromotoare prin această metodă este reprezentat în figura 3-27.

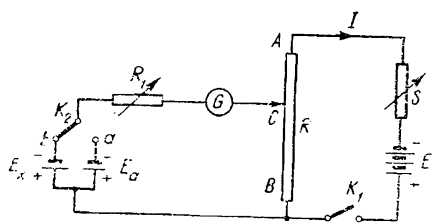


Fig. 3—27. Metoda de compensație de opoziție prin substituție.

unei rezistențe $BC = R_0$. În acest moment căderea de tensiune la bornele rezistenței R_0 este egală cu forța electromotoare a elementului normal:

$$E_0 = R_0 I. \quad (3-17)$$

Se conectează apoi în serie cu galvanometrul forța electromotoare de măsurat E_x , mutînd comutatorul K_2 pe poziția b ; variînd din nou poziția cursorului C , se obține echilibrul galvanometrului pentru o altă valoare a rezistenței $BC = R_x$. În acest caz, forța electromotoare de măsurat este egală cu căderea de tensiune la bornele rezistenței R_x :

$$E_x = R_x I. \quad (3-18)$$

Curentul I fiind același în ambele cazuri, deoarece rezistența R este aceeași, din relațiile de mai sus rezultă:

$$\frac{E_0}{E_x} = \frac{R_0}{R_x},$$

de unde:

$$E_x = \frac{R_x}{R_0} E_0. \quad (3-19)$$

În practică, pentru simplificarea măsurării s-au adus câteva îmbunătățiri. Astfel, pentru a se evita calculul, în loc de a se stabili în circuitul principal un curent I de valoare oarecare, printr-o operație preliminară, numită *tarare*, se stabilește un curent de valoare cunoscută, de exemplu $I = 10^{-3}$ A sau $I = 10^{-4}$ A. Pentru aceasta se fixează mai întîi poziția cursorului C al rezistenței R astfel ca $R_0 = 1000 E_0$ (dacă se alege curentul în circuitul principal $I = 10^{-3}$ A). Se închide apoi circuitul principal și se variază intensitatea curentului din acest circuit cu ajutorul rezistenței variabile S pînă cînd, introducînd în circuitul de măsurare elementul normal, se obține echilibrul galvanometrului. În acest moment curentul din circuitul principal are valoarea $I = 10^{-3}$ A. În acest caz, introducînd în circuitul de măsurare bateria E_x , a cărei forță electromotoare se măsoară, și variînd poziția cursorului C , se obține la echilibrul galvanometrului, pentru o valoare a rezistenței $BC = R_x$, valoarea forței electromotoare:

$$E_x = R_x I = \frac{R_x}{1000}. \quad (3-20)$$

Constanța valorii curentului din circuitul principal la valoarea stabilită prin tarare constituie condiția esențială pentru asigurarea exactității măsurărilor. Se poate întâmpla însă ca în decursul măsurărilor valoarea curentului I să varieze datorită încălzirii rezistențelor sau din alte cauze. De aceea trebuie ca tararea să fie verificată periodic. Pentru simplificarea operațiilor de verificare a tarării, montajul metodei de opoziție prin substituție a suferit o oarecare modificare, în sensul că s-au creat două circuite de măsurare independente: unul auxiliar pentru tarare și unul pentru măsurare (fig. 3-28).

În acest scop s-a introdus în circuitul principal în serie cu rezistențele R și S încă o rezistență etalon de mare precizie $R_0 = 1\,000\,E_0$ (sau $10\,000\,E_0$, în funcție de valoarea curentului care se stabilește în circuitul principal). La bornele acestor rezistențe se conectează circuitul auxiliar pentru tarare.

Metoda de măsurare este aceeași ca în cazul precedent. Galvanometrul se conectează cu ajutorul comutatorului K_2 în circuitul auxiliar când se face tararea sau verificarea tarării și în circuitul de măsurare când se măsoară forțele electromotoare.

Se constată că în momentul măsurării, curentul în circuitul de măsurare (prin elementul normal sau prin elementul de măsurat) este egal cu zero. Aceasta înseamnă că metoda de opoziție prin substituție permite măsurarea forțelor electromotoare, fără consum de energie de la circuitul de măsurat, ceea ce constituie calitatea esențială a metodelor de compensație.

Măsurarea tensiunilor se efectuează cu montajele de compensație descrise, conectându-se la bornele E_x ale circuitului de măsurare, în locul unei forțe electromotoare, tensiunea de măsurat. Tensiunea maximă care se poate măsura direct cu aceste montaje este de 1,1 V (fiind determinată de căderea de tensiune maximă din circuitul principal). Pentru măsurarea tensiunilor mai mari se utilizează divizoare de tensiune (fig. 3-29), cu rapoarte de reducere 10 : 1, 100 : 1, 1 000 : 1. Acestea sînt alcătuite dintr-o rezistență secționată, de valoare mare (de obicei $10^6\,\Omega$) cu borne de ieșire separate pentru fiecare secțiune. Tensiunea de măsurat se aplică la bornele întregii rezistențe, la circuitul de măsurare conectându-se numai anumite secțiuni în funcție de raportul de reducere ales.

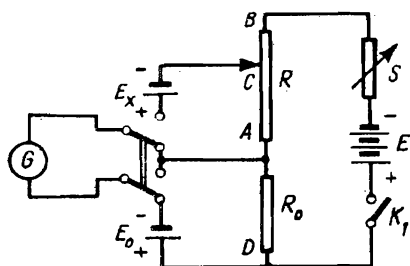


Fig. 3—28. Metoda de compensație de opoziție prin substituție perfecționată.

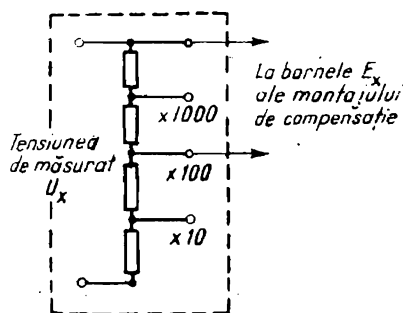


Fig. 3—29. Schema divizorului de tensiune folosit în metodele de compensație.

Măsurarea curenților se efectuează cu ajutorul acelorași montaje de compensație, aplicându-se la bornele E_x ale circuitului de măsurare, căderea de tensiune produsă de curentul de măsurat într-o rezistență etalon R_0 (fig. 3-30).

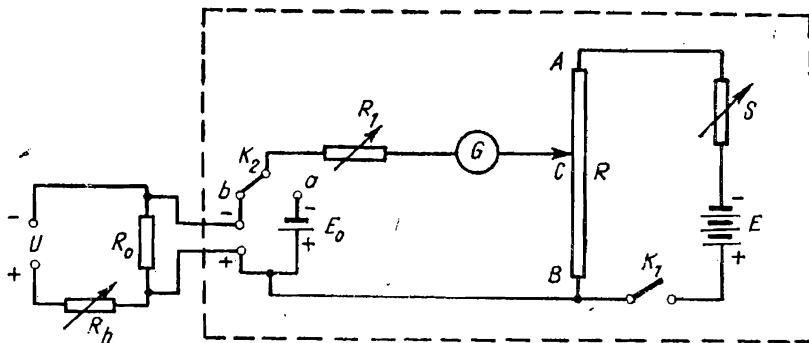


Fig. 3-30. Schema de măsurare a curenților prin metoda de compensație.

Din valoarea măsurată U_0 a căderii de tensiune în rezistența etalon se deduce intensitatea curentului de măsurat I_x :

$$I_x = \frac{U_0}{R_0}. \quad (3-21)$$

2. COMPENSATOARE DE CURENT CONTINUU

În practică, pentru măsurări prin metode de compensație se folosesc aparate speciale numite *compensatoare*.

Compensatoarele de curent continuu sînt construite pe baza schemelor de compensație descrise. Constructiv, ele diferă după valoarea și modul de realizare a rezistenței de compensație R .

Compensatoarele trebuie să asigure un curent constant în circuitul principal, conectarea independentă a elementului normal și a forței electromotoare de măsurat (permițînd astfel controlul curentului principal în orice moment, printr-o simplă trecere a unui comutator de pe o poziție pe alta) și posibilitatea unei citiri precise și simple a valorii rezistenței de compensație (sau a căderii de tensiune în ea).

În scopul asigurării unui curent constant în circuitul principal, indiferent de reglajul rezistenței R pe care se produce căderea de tensiune de compensare, rezistența de compensare este realizată după scheme potențio-metrice care permit ca valoarea sa totală să rămînă constantă în timpul compensării. Această rezistență se construiește sub forma unor rezistențe decadice care oferă posibilitatea de variație în limitele largi și precise a valorii lor. În practică se utilizează două tipuri de rezistențe decadice: rezistențe cu decade șuntate și rezistențe cu decade duble. Aceste rezistențe sînt prevăzute cu cusoare duble cuplate mecanic și izolate electric, care nu culeg un singur potențial, ci o anumită parte din căderea de tensiune de pe întreaga rezistență.

În construcția compensatoarelor se folosesc mai multe rezistențe decadice după necesitate. În figura 3-31 este redată schema electrică a unui compensator de curent continuu cu două rezistențe cu decade șuntate (alcătuite din rezistențele principale R_1 și R_3 și decadele de șuntare R_2 și R_4),

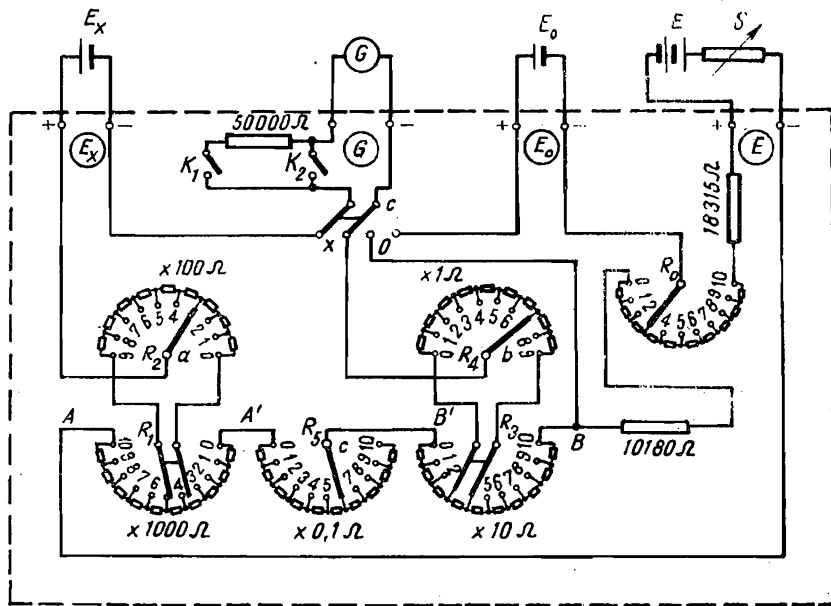


Fig. 3—31. Schema electrică a unui compensator de curent continuu.

construit pe baza montajului de opoziție prin substituție perfecționat (v. fig. 3-28). Cele două rezistențe cu decade șantate (una cu decade de câte $1000\ \Omega$ și cealaltă cu decade de câte $10\ \Omega$ reglează valorile de mii și sute respectiv zeci și unități. Fixarea ultimei cifre (a zecimilor) se face cu ajutorul unei rezistențe decadice R_5 , cu cursor simplu. Rezistența etalon R_0 pentru tararea compensatorului este compusă dintr-o rezistență fixă de $10180\ \Omega$ și o cutie de rezistențe cu manete de $10 \times 1\ \Omega$ legate în serie. Cutia de rezistențe cu manete se numește „decada de temperatură”, deoarece permite ca valoarea rezistenței etalon să fie fixată totdeauna numeric de $10\ 000$ de ori mai mare decât forța electromotoare a elementului normal, indiferent de temperatura mediului ambiant (forța electromotoare a elementului normal variază cu temperatura).

3. COMPENSATOARE DE CURENT ALTERNATIV

Compensatoarele de curent alternativ sînt construite pe principiul metodei de compensație de opoziție simplă. În curent alternativ este însă necesar a se realiza egalitatea între tensiunea cunoscută de compensație și tensiunea

de măsurat atît ca amplitudine cît și ca fază, frecvență și formă. Identitatea de frecvență și formă se realizează alimentînd compensatorul și circuitul de măsurat de la aceeași sursă (de exemplu un transformator cu mai multe înfășurări secundare). Egalitatea amplitudinii și fazei se obține prin reglarea tensiunii de compensare cu ajutorul compensatorului. Aceasta se poate realiza în două moduri:

— prin reglarea independentă a amplitudinii și a fazei tensiunii de compensare; pe acest principiu se construiesc compensatoarele în coordonate polare;

— prin reglarea simultană a amplitudinii și fazei tensiunii de compensare cu ajutorul a două căderi de tensiune defazate una față de alta cu 90° ; pe acest principiu se construiesc compensatoarele în coordonate rectangulare.

D. TRANSFORMATOARE DE MĂSURAT

Transformatoarele de măsurat sînt transformatoare electrice speciale care reduc tensiunile înalte sau curenții mari la valori mai mici (100 V ; 5 A) pentru care se pot construi aparate de măsurat, relee sau aparate de comandă și protecție ieftine și precise. Prin aceasta transformatoarele de măsurat permit extinderea domeniului de măsurare și standardizarea pentru valori nu prea mari a aparatelor de măsurat.

Principiul de funcționare al transformatoarelor de măsurat nu se deosebește de cel al transformatoarelor de forță, constînd în transferul de energie electromagnetică de la o înfășurare primară la o înfășurare secundară prin fenomenul de inducție electromagnetică.

După mărimea care este redusă, se deosebesc *transformatoare de curent* și *transformatoare de tensiune*.

1. TRANSFORMATOARE DE CURENT

Transformatoarele de curent sînt destinate reducerii curenților alternativi de intensitate mai mare de 50 A la valori mai mici, de obicei 5 A (mai rar 1A). În acest scop transformatoarele de curent se construiesc cu foarte puține spire în înfășurarea primară și un număr mare de spire în înfășurarea secundară pentru a fi îndeplinită relația $\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1}$.

Înfășurarea primară a transformatoarelor de curent se leagă în serie în circuitul curenului care se măsoară, iar înfășurarea secundară se conectează direct în serie cu aparatele de măsurat (fig. 3-32).

Caracteristic pentru transformatoarele de curent este faptul că, înfășurarea lor secundară fiind conectată numai pe aparatele de măsurat a căror impedanță este neînsemnată (0,2—0,8 Ω), regimul lor de funcționare este apropiat de cel în scurtcircuit.

Curentul din circuitul primar al transformatoarelor de curent nu depinde de impedanța circuitului secundar. La deschiderea circuitului secundar însă ($Z_2 = \infty$ și $I_2 = 0$), fluxul magnetic și ca urmare și inducția magnetică cresc foarte mult ($B \cong 1,5 \dots 2 \text{ Wb/m}^2$), ceea ce duce la o puternică supraîncălzire a miezului transformatorului. Totodată fluxul magnetic mare induce în înfășurarea secundară tensiuni periculoase (circa 1000 V). Din această cauză este necesar ca înfășurarea secundară a transformatoarelor de curent să fie întotdeauna închisă pe aparatele de măsurat sau scurtcircuitată.

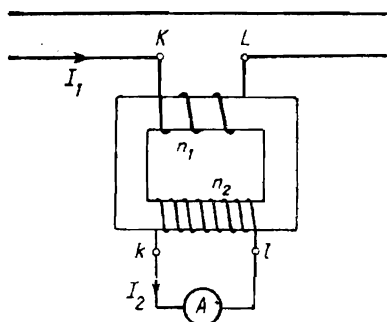


Fig. 3—32. Schema transformatorului de curent.

Transformatoarele de curent având înfășurarea primară conectată în serie în circuitul receptoarelor de energie, pot fi parcurse și de curenți de scurtcircuit. Din această cauză ele sînt astfel construite încît să reziste solicitărilor termice și dinamice ale curenților de scurtcircuit.

Raportul dintre valoarea efectivă a curentului I_1 din înfășurarea primară și valoarea curentului secundar I_2 măsurat se numește *raport de transformare efectiv* K_i :

$$K_i = \frac{I_1}{I_2}. \quad (3-22)$$

Acest raport variază puțin cu regimul de funcționare a transformatorului, care este determinat de valoarea și natura sarcinii, frecvența și valoarea curentului. Din această cauză curentul primar de măsurat nu se determină din curentul secundar I_2 măsurat, cu raportul efectiv de transformare K_i , ci cu raportul dintre curenții nominali I_{1n} și I_{2n} din cele două circuite ale transformatorului, care este constant (indicat de fabrica constructoare) și se numește *raportul de transformare nominal* K_{in} :

$$K_{in} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}, \quad (3-23)$$

Cu acest raport valoarea I_{1m} obținută pentru curentul primar:

$$I_{1m} = K_{in} I_2$$

diferă puțin față de valoarea sa efectivă I_1 , apărînd o eroare de raport de transformare, numită *eroare de curent*:

$$\Delta_i = \frac{I_{1m} - I_1}{I_1} = \frac{K_{in} I_2 - K_i I_2}{K_i I_2} = \frac{K_{in} - K_i}{K_i}. \quad (3-24)$$

În afară de eroarea de raport de transformare Δ_i , transformatoarele de curent au și o *eroare de unghi* δ_i , care reprezintă unghiul de defazaj dintre vectorul curentului primar I_1 și vectorul curentului secundar I_2 rotit cu

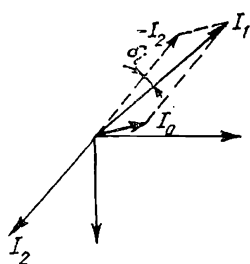


Fig. 3 — 33. Eroarea de unghi a transformatoarelor de măsurat.

180° (fig. 3-33). Aceasta eroare este pozitivă când vectorul curentului secundar rotit cu 180° este deplasat înaintea vectorului curentului primar. Eroarea de unghi interesează în cazul când în circuitul secundar sînt conectate aparate ale căror indicații depind de defazajul dintre curent și tensiune (wattmetre, contoare etc.).

Clasa de precizie a transformatoarelor reprezintă eroarea de curent (în procente) în condițiile nominale de funcționare. Conform STAS 4324—62, transformatoarele de curent se execută în clasele de precizie: 0,2 — 0,5 — 1 și 3.

Erorile transformatorului de curent sînt datorate existenței amperspirelor de magnetizare, adică faptului că reluctanța circuitului magnetic este diferită de zero. Din această cauză transformatoarele de curent se construiesc cu circuite magnetice, de lungime mică și secțiune mare, din materiale cu permeabilitate magnetică mare (permalloy) pentru a se micșora cît mai mult reluctanța și deci erorile.

Erorile transformatoarelor de curent variază, de asemenea, cu curentul primar și impedanța secundară. Erorile cresc cu cît curentul primar este mai mic și cu cît impedanța secundară este mai mare (ca modul). La sarcini secundare inductive, erorile de curent cresc în timp ce acelea de unghi scad. Ca urmare, pentru menținerea unei anumite precizii, variația curentului primar și a impedanței secundare este limitată între anumite valori ($0,1 - 1,2 I_n$ și $0,25 Z_{2n} - Z_{2n}$). În același scop se stabilește și o sarcină secundară nominală Z_{2n} , căreia îi corespunde puterea nominală a transformatorului și care determină numărul aparatelor de măsurat care se pot conecta în circuitul secundar.

Pentru conectarea corectă în circuitul de măsurare, transformatoarele de curent au bornele înfășurărilor primare și secundare marcate cu literele K și L , respectiv cu k și l . Legătura se face astfel încît curentul să treacă prin înfășurarea primară de la borna K la borna L , iar în circuitul secundar exterior înfășurării transformatorului de la borna k la borna l (v. fig. 3-32).

Transformatoarele de curent se construiesc de obicei cu mai multe limite de măsurare. În figura 3-34 este reprezentat un transformator de curent cu mai multe limite de măsurare, avînd înfășurarea primară compusă din două părți, corespunzătoare curenților nominali de 15 și 50 A, și înfășurarea secundară corespunzătoare unui curent nominal de 5 A. Transformatorul se poate utiliza și pentru reducerea unor curenți mai mari (100—600 A) trecînd conductorul primar prin gaura transformatorului o dată sau de mai multe ori.

Transformatoarele de curent se construiesc fie ca transformatoare de uz industrial, fie ca transformatoare de laborator. Transformatoarele industriale au de obicei un singur domeniu de măsurare, pe cînd cele de laborator mai multe.

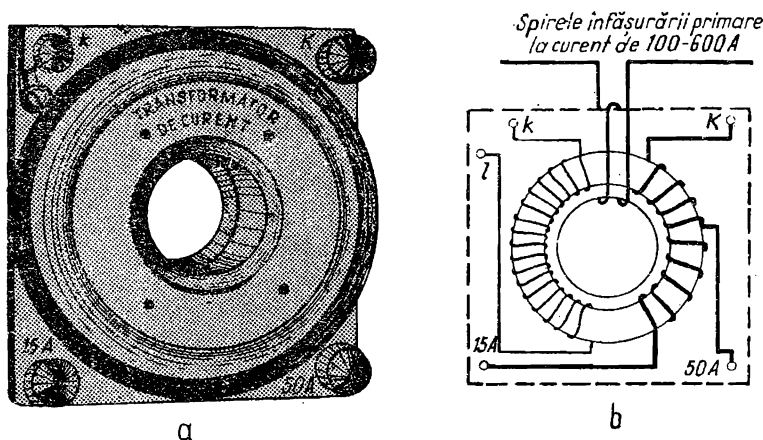


Fig. 3-34. Transformator de curent cu mai multe limite de măsurare:
a - vedere; b - schemă.

2. TRANSFORMATOARE DE TENSIUNE

Transformatoarele de tensiune sînt destinate reducerii tensiunilor alternative mai mari de 500 V, la tensiunea secundară standard de 100 V (sau 110 V). În acest scop transformatoarele de tensiune se construiesc cu un număr mare de spire în înfășurarea primară și cu puține spire în înfășurarea secundară.

Înfășurarea primară a transformatoarelor de tensiune se leagă la rețeaua a cărei tensiune se măsoară, iar cea secundară se conectează direct cu aparatul de măsurat (fig. 3-35).

Rezistența aparatelor conectate la înfășurarea secundară fiind mare, curenții prin înfășurările transformatoarelor de tensiune sînt mici și ca urmare acestea funcționează în condiții apropiate de condițiile de mers în gol (curentul de magnetizare fiind comparabil cu cel de sarcină).

Transformatoarele de tensiune spre deosebire de cele de curent pot funcționa cu circuitul secundar deschis (în gol) fără nici un pericol, pe cînd scurtcircuitarea acestuia duce la arderea înfășurărilor. Pentru a preîntîmpina aceasta transformatoarele de tensiune se conectează la rețea prin intermediul siguranțelor fuzibile.

În mod analog ca la transformatoarele de curent se definesc și la transformatoarele de tensiune:

— raportul de transformare efectiv:

$$K_u = \frac{U_1}{U_2}; \quad (3-25)$$

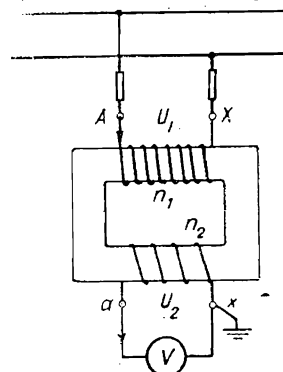


Fig. 3-35. Schema transformatorului de tensiune.

— raportul de transformare nominal:

$$K_{un} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}; \quad (3-26)$$

— eroarea de tensiune:

$$\Delta_u = \frac{U_{1m} - U_1}{U_1} = \frac{K_{un}U_2 - K_u U_2}{K_u U_2} = \frac{K_{un} - K_u}{K_u}, \quad (3-27)$$

unde U_1 este tensiunea primară;

U_2 — tensiunea secundară măsurată;

$U_{1m} = K_{un}U_2$ — tensiunea primară măsurată;

U_{1n} și U_{2n} — tensiunile nominale ale înfășurărilor primară și secundară;

— eroarea de unghi δ_u : unghiul de decalaj dintre vectorul tensiunii primare și vectorul tensiunii secundare rotit cu 180° .

Erorile transformatoarelor de tensiune sînt datorate căderilor de tensiune din înfășurările primară și secundară, adică rezistențelor înfășurărilor. Pentru micșorarea rezistențelor, înfășurările transformatoarelor se construiesc pentru o densitate de curent mult mai mică decît a transformatoarelor de forță ($0,1 - 0,3 \text{ A/mm}^2$).

Erorile transformatoarelor de tensiune depind — pentru o construcție dată — de tensiunea primară, de frecvență și de impedanța secundară. Variația lor este însă mai mică decît în cazul transformatoarelor de curent, deoarece tensiunea primară variază puțin, iar frecvența este practic constantă.

La fel ca la transformatoarele de curent, în circuitul secundar al

transformatoarelor de tensiune nu se poate conecta decît un număr limitat de aparate de măsurat al căror consum total corespunde puterii nominale a transformatorului (măsurată la bornele secundarului), pentru care erorile nu depășesc valorile corespunzătoare clasei de precizie.

Puterea nominală a unui transformator de tensiune nu trebuie confundată cu puterea sa maximă, care este cea mai mare putere admisă în regim de lucru de lungă durată, fără a se lua în considerație erorile.

Pe baza erorilor tolerate, STAS 4323—62 împarte transformatoarele de tensiune în patru clase de precizie: 0,2—0,5—1 și 3.

Bornele înfășurărilor primare și secundare ale transformatoarelor de tensiune se marchează cu literele A și X, respectiv a și x. Transformatoarele se conectează în circui-

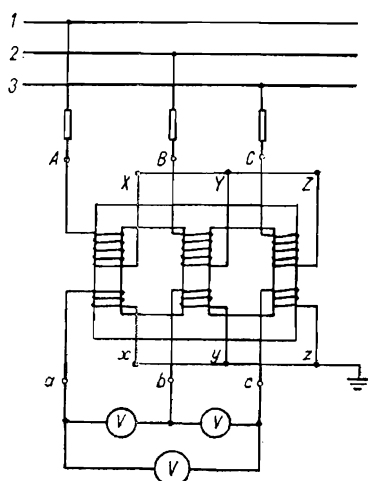


Fig. 3—36. Schema transformatoarelor de tensiune trifazate.

tul de măsurare astfel încît curentul trece prin înfășurarea primară de la borna A la borna X , iar în circuitul secundar exterior înfășurării de la borna a la borna x (v. fig. 3-35). În cazul transformatoarelor trifazate, bornele primare se marchează cu literele A, B, C și X, Y, Z , iar bornele secundare cu literele a, b, c și x, y, z . Borna punctului neutru se marchează cu litera N , respectiv cu n .

Înfășurarea secundară și miezul magnetic al transformatoarelor de tensiune trebuie să fie puse la pămînt.

Transformatoarele de tensiune pot fi monofazate, bifazate sau trifazate. Transformatoarele trifazate constau dintr-un circuit magnetic alcătuit din trei miezuri; pe fiecare miez se găsește cîte o înfășurare primară și secundară conectate între ele conform schemei din figura 3-36.

Capitolul IV

MĂSURAREA REZISTENȚELOR

Prin rezistența unui receptor pasiv se înțelege de obicei rezistența lui în curent continuu, egală cu raportul dintre tensiunea aplicată și curentul absorbit sau cu raportul dintre puterea absorbită prin efect Joule-Lenz și pătratul intensității curentului absorbit. În curent alternativ puterea activă absorbită de receptorul pasiv modificându-se cu creșterea frecvenței datorită efectului pelicular, pierderilor prin curenții turbionari și prin histeresis magnetic sau dielectric, rezistența se definește ca fiind raportul dintre puterea activă consumată și pătratul valorii efective a curentului absorbit de receptor.

Rezistențele folosite în circuitele electrice și electronice au valori de la câteva fracțiuni de ohm până la $10^{16} \Omega$, în gama frecvențelor de la curent continuu până la sute de MHz.

Există numeroase metode de măsurare a rezistențelor electrice, acestea diferind după specificul și mărimea rezistenței de măsurat, precizia urmărită și aparatele de măsurat utilizate. Cele mai uzuale sînt metodele de măsurare a rezistenței în curent continuu. Pentru măsurări de precizie se folosesc metodele de punte sau de compensație, iar pentru măsurări industriale metoda ampermetrului și voltmetrului sau ohmmetre electrice și electronice.

A. MĂSURAREA REZISTENȚELOR PRIN METODE DE PUNTE

Metodele de punte sînt metode de compensație de zero. Circuitul de măsurare al metodelor de punte (cunoscut de obicei sub numele de „punte”) se compune din patru impedanțe, care formează laturile unui patrulater închis, un aparat indicator de zero legat într-una din diagonalele patrulaterului și sursa de alimentare conectată în cea de-a doua diagonală. După mărimea care se măsoară, punțile pot fi alimentate în curent continuu sau în curent alternativ.

Principiul metodelor de punte constă în echilibrarea electrică a punții care se caracterizează prin lipsa curentului în diagonala aparatului de zero. Valoarea mărimii de măsurat rezultă din condiția de echilibru a punții în funcție de impedanțele cunoscute din laturile patrulaterului.

Metodele de punte fiind metode de zero au o sensibilitate și precizie mare de măsurare, nefiind influențate de etalonarea aparatului de zero și de variațiile sursei de alimentare.

Pentru măsurarea rezistențelor se folosesc punți de curent continuu. Dintre acestea cele mai utilizate sînt puntea Wheatstone, cu care se măsoară rezistențe cuprinse între $1\ \Omega$ și $1\text{ M}\Omega$, și puntea dublă Thomson, pentru rezistențe foarte mici, sub $1\ \Omega$ pînă la $10^{-6}\ \Omega$.

1. PUNTEA WHEATSTONE

Puntea Wheatstone (fig. 4-1) este alcătuită din trei rezistențe cunoscute, R_1 , R_2 și R_3 , care împreună cu rezistența de măsurat R_x formează laturile patrulaterului $ABCD$, un galvanometru de curent continuu (cu sensibilitate $10^{-7} - 10^{-9}\text{ A/mm}$) ca aparat de zero într-una din diagonalele patrulaterului, iar în cealaltă diagonală o sursă de curent continuu (de $1,5 - 4\text{ V}$) și o rezistență r pentru limitarea curentului în circuit.

Echilibrarea electrică a punții Wheatstone se realizează prin variația rezistențelor cunoscute din laturile patrulaterului, pînă ce curentul prin diagonală galvanometrului ajunge egal cu zero. Aceasta corespunde egalității potențialelor în punctele C și D , la care este conectat aparatul de zero, situație care este posibilă numai în cazul cînd căderile de tensiune în brațele AC și AD și respectiv, în brațele CB și DB sînt egale, adică:

$$U_{AC} = U_{AD} \text{ și } U_{CB} = U_{DB}$$

sau cu notațiile din figura 4-1:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \text{ și } I_1 R_x = I_2 R_3. \quad (4-1)$$

Făcînd raportul dintre aceste două relații, se obține condiția de echilibru a punții Wheatstone:

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3} \quad (4-2)$$

sau:

$$R_1 R_3 = R_2 R_x. \quad (4-3)$$

Se observă că condiția de echilibru a punții depinde numai de cele patru rezistențe din brațe, fiind independentă de rezistențele interne ale sursei de curent și aparatului indicator de zero.

Din condiția de echilibru rezultă valoarea rezistenței de măsurat:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3. \quad (4-4)$$

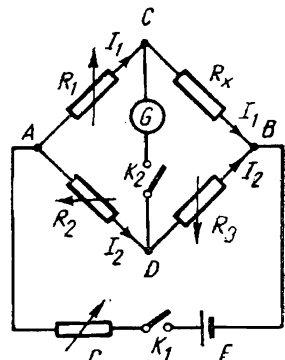


Fig. 4-1. Schema punții Wheatston

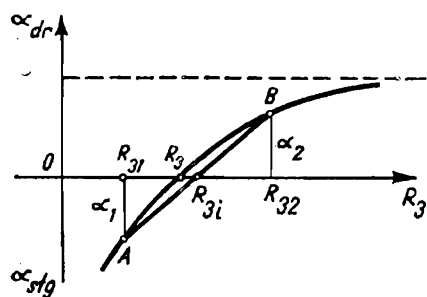


Fig. 4—2. Variația deviațiilor galvanometrului în funcție de rezistența de comparație.

Rezistențele cunoscute R_1 și R_2 constituie rezistențele de raport, iar rezistența R_3 , rezistența de comparație.

Practic, echilibrul punții Wheatstone se obține fie fixând rezistențele R_1 și R_2 într-un raport constant și variind rezistențele de comparație R_3 , fie invers, menținând constantă rezistența de comparație R_3 și variind raportul dintre rezistențele R_1 și R_2 .

Rezistențele de raport sînt, cutii de rezistențe de $1 + 10 + 100 + 1\,000\ \Omega$, care permit fixarea unui raport egal cu o putere întreagă a lui 10, între 10^{-3} și 10^3 . Rezistența de comparație R_3 este în general

o rezistență cu decade, de $0,1 - 11\,111\ \Omega$. Din cauza variației în trepte a rezistenței de comparație, de multe ori nu se poate realiza echilibrul punții, galvanometrul avînd deviații α_1 și α_2 în sensuri diferite pentru două valori R_{31} și R_{32} ($R_{32} > R_{31}$) foarte apropiate ale rezistenței de comparație. În acest caz, rezistența de echilibru se află prin metoda interpolării, aproximînd curba variației deviațiilor galvanometrului cu rezistența R_3 în vecinătatea punctului de echilibru cu o dreaptă (fig. 4-2) și calculînd cu relația:

$$R_{3i} = R_{31} + (R_{32} - R_{31}) \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (4-5)$$

Sensibilitatea punții Wheatstone este definită de variația deviației $\Delta\alpha$ a aparatului de zero la o schimbare relativă foarte mică $\frac{\Delta R_3}{R_3}$ a rezistenței care a produs-o în jurul valorii care dă echilibrul punții:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\frac{\Delta R_3}{R_3}}. \quad (4-6)$$

Sensibilitatea se poate determina experimental luînd $\Delta R_3 = R_{32} - R_{31}$ pentru care $\Delta\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ (fig. 4-2), astfel încît:

$$S = R_{3i} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{R_{32} - R_{31}}. \quad (4-7)$$

Teoretic, sensibilitatea maximă a punții Wheatstone se obține în cazul cînd $R_1 = R_2 = R_3 = R_x$ = rezistența galvanometrului, ceea ce însă este greu de realizat. Sensibilitatea punții este redusă pentru valorile foarte mici și foarte mari ale rezistențelor R_1 și R_2 . Precizia măsurărilor cu puntea Wheatstone este de circa $0,5\%$.

Domeniul de măsurare al punților Wheatstone este determinat de valorile limită ale rezistențelor de raport și de comparație. În practică însă domeniul este limitat între $1\ \Omega$ și $10^6\ \Omega$. În afara acestor limite erorile de măsu-

rare cresc foarte mult, datorită influenței rezistențelor conductoarelor de legătură și a rezistențelor de contact a bornelor de conectare la punte a rezistenței de măsurat, în cazul rezistențelor de măsurat sub 1Ω , și datorită reducerii sensibilității punții din cauza micșorării curenților în brațele punții, în cazul rezistențelor de măsurat peste $10^6 \Omega$.

Realizările constructive ale punții Wheatstone sînt diferite. Punțile de precizie se construiesc cu raport constant și rezistența de comparație variabilă (fig. 4-3, *a*). Pentru măsurări curenți în atelierile de montaj sau de reparații electrice se folosesc punți cu raport variabil, realizat cu ajutorul unui reostat cu fir calibrat cu cursor (fig. 4-3, *b*). Aceste punți au în general montate pe ele un galvanometru și funcționează cu ajutorul unei baterii uscate. Punțile cu fir calibrat cu cursor se manipulează mai ușor, dar au o precizie mai redusă.

2. PUNTEA DUBLĂ THOMSON

Rezistențele mici (sub 1Ω , pînă la $10^{-6} \Omega$) se măsoară cu puntea dublă Thomson, în care se elimină influența rezistențelor, contactelor și conductoarelor de legătură asupra circuitului de măsurare, prin plasarea lor într-un circuit auxiliar.

Rezistența de măsurat R_x (fig. 4-4) este legată în serie cu o rezistență de comparație etalon R_0 și cu sursa de curent continuu (acumulatorul E). Rezistențele R_x și R_0 împreună cu rezistențele R_1, R_2, R_3 și R_4 alcătuiesc brațele punții. Prin variația rezistențelor R_1, R_2, R_3 și R_4 se obține echilibrarea punții.

La echilibrul punții, cînd prin galvanometru nu trece nici un curent, scriind teorema a doua a lui Kirchhoff pentru cele trei circuite ale punții, se obține:

- pentru circuitul $R_x R_1 G R_3$: $I R_x + I_2 R_3 = I_1 R_1$;
- pentru circuitul $R_0 R_2 G R_4$: $I R_0 + I_2 R_4 = I_1 R_2$;
- pentru circuitul $R_3 R_4 r$: $I_2 (R_3 + R_4) = (I - I_2) r$.

Rezolvînd aceste ecuații în raport cu R_x , se obține:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 + \frac{R_4 r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right). \quad (4-8)$$

Dacă se ia $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ termenul al doilea este egal cu zero și rezistența de măsurat R_x se obține cu expresia simplă, asemănătoare celei din cazul Wheatstone:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}. \quad (4-9)$$

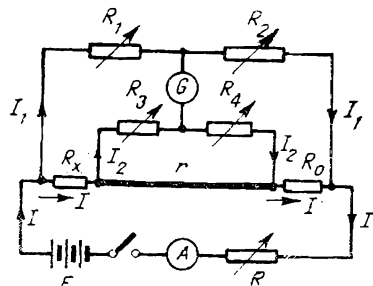


Fig. 4—4. Schema punții duble Thomson.

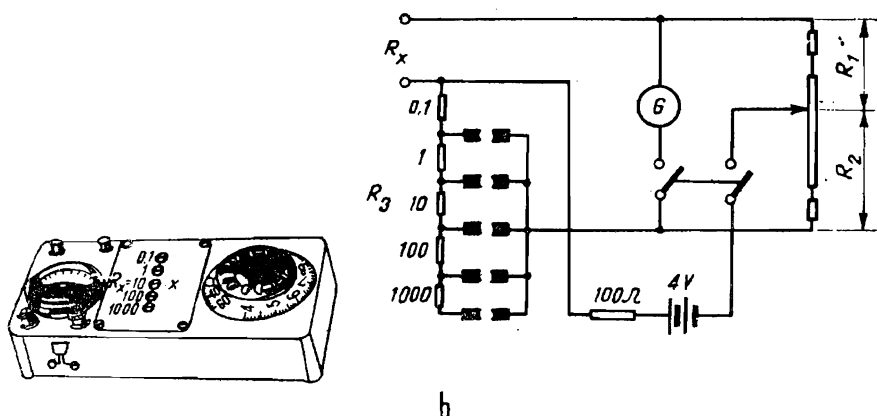
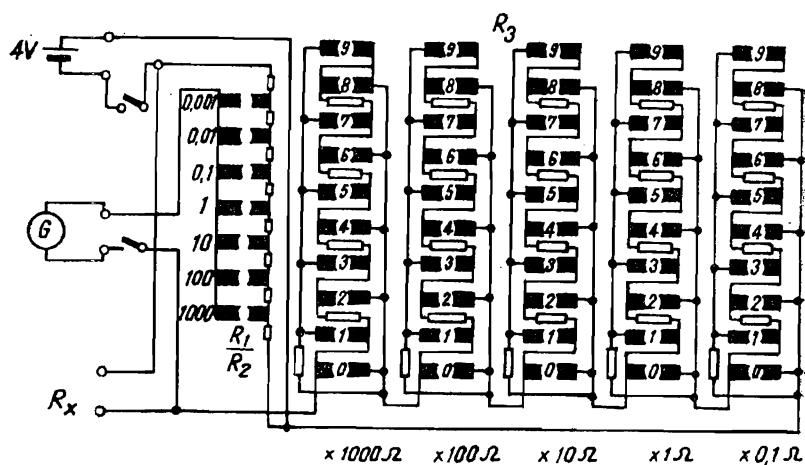
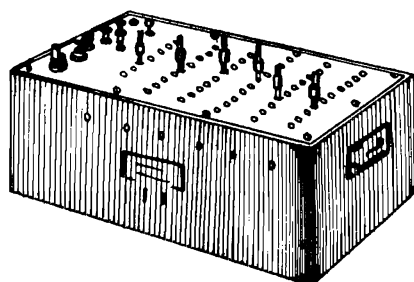


Fig. 4—3. Schemele punților Wheatstone

Condiția $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ se obține prin realizarea constructivă a egalității rezistențelor R_1 și R_3 , respectiv R_2 și R_4 . Datorită rezistențelor conductoarelor de legătură a contactelor, egalitatea rezistențelor $R_1 = R_3$ și $R_2 = R_4$ nu este perfectă. Din această cauză este necesar ca rezistențele R_1 , R_2 , R_3 și R_4 să capete valori cât mai mari (minimum 10 Ω), iar legătura dintre rezistența de măsurat R_x și rezistența etalon R_0 să se facă cu un conductor de secțiune mare și lungime mică avînd rezistența r cât mai mică ($r \simeq 0$).

Sensibilitatea punții duble depinde în principal de sensibilitatea de tensiune a galvanometrului și de intensitatea curentului în circuitul auxiliar (acesta însă este limitat de condiția de a nu încălzi rezistențele R_x și R_0). Precizia măsurărilor cu puntea dublă poate ajunge pînă la 0,1%.

Punțile duble se construiesc cu raportul brațelor $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ constant sau variabil. În practică se folosesc de obicei punți cu raportul brațelor variabil prin reglarea brațelor R_1 și R_3 care formează o rezistență cu decade duble cu manete cuplate mecanic; brațele R_2 și R_4 constau din cutii de rezistențe cu fișe care capătă valori egale fixe, iar rezistența etalon R_0 este o rezistență etalon fixă care se conectează în circuitul auxiliar, exterior punții. La punțile cu raportul brațelor constant echilibrul se obține prin variația rezistenței etalon R_0 care este sub forma unui fir calibrat cu cursor și scară.

B. MĂSURAREA REZISTENȚELOR PRIN METODA DE COMPENSAȚIE

Metoda de compensație permite determinarea cu precizie a rezistențelor electrice prin măsurarea căderii de tensiune la bornele lor. În acest scop rezistența de măsurat se leagă într-un circuit auxiliar (fig. 4-5) în serie cu o rezis-

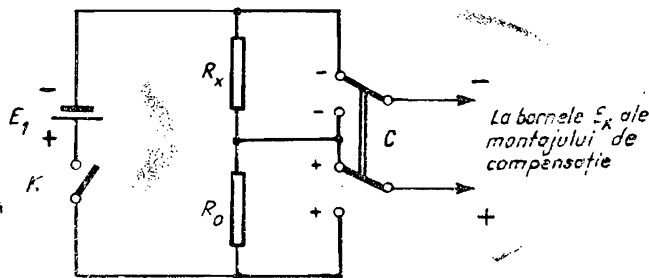


Fig. 4—5. Schema de măsurare a rezistențelor prin metoda de compensație.

tență etalon R_0 (pe cât posibil de același ordin de mărime cu rezistența R_x) și cu o baterie de alimentare E_1 . Curentul I din circuitul auxiliar trebuie să aibă o valoare constantă, care să nu depășească valoarea maximă admisibilă în cele două rezistențe R_x și R_0 . Cu ajutorul comutatorului C se conectează

pe rînd cele două rezistențe R_x și R_0 la bornele E_x ale montajului de compensație (în locul forței electromotoare de măsurat E_x) și se măsoară căderile de tensiune $U_x = R_x I$ și $U_0 = R_0 I$, din care se deduce valoarea rezistenței de măsurat:

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0} \quad (4-10)$$

C. MĂSURAREA REZISTENȚELOR CU METODA AMPERMETRULUI ȘI VOLTMETRULUI

Metoda ampermetrului și voltmetrului se bazează pe folosirea legii lui Ohm și constă din măsurarea curentului I_x și a căderii de tensiune U_x în rezistența de măsurat R_x și din determinarea valorii acesteia din raportul $R_x = \frac{U_x}{I_x}$.

Măsurarea se poate face cu două montaje, care diferă între ele prin modul cum se leagă voltmetrul în circuit, astfel:

— *montajul aval* (fig. 4-6, a), în care voltmetrul este montat în derivație direct la bornele rezistenței de măsurat și ca urmare măsoară căderea de tensiune U_x în această rezistență, iar ampermetrul indică atît intensitatea curentului I_x care trece prin rezistența de măsurat R_x cît și intensitatea curentului $I_v = \frac{U}{R_v}$, absorbit de voltmtru (R_v fiind rezistența internă a voltmetrului);

— *montajul amonte* (fig. 4-6, b), în care voltmetrul este montat la borna de intrare a ampermetrului și la borna de ieșire a rezistenței de măsurat, măsurînd astfel atît căderea de tensiune U_x în această rezistență cît și căderea de tensiune $U_A = R_A I$ în ampermetru (R_A fiind rezistența internă a ampermetrului), iar ampermetrul măsoară curentul I_x care trece prin rezistență.

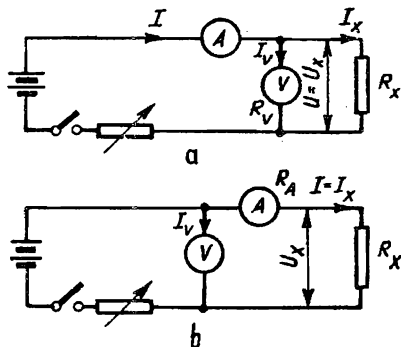


Fig. 4—6. Schemele de măsurare a rezistențelor prin metoda ampermetrului și voltmetrului.

Rezistența de măsurat R_x fiind determinată de raportul dintre căderea de tensiune U_x de la bornele sale și curentul I_x care trece prin ea ($R_x = \frac{U_x}{I_x}$), dacă se

folosesc pentru calcul indicațiile U și I ale aparatelor de măsurat, ambele montaje prezintă o eroare sistematică de metodă. De aceea în ambele cazuri pentru aflarea unei valori a rezistenței măsurate cît mai apropiată de valoarea adevărată trebuie să se facă corectarea rezultatelor obținute ținînd seama de consumul propriu al aparatelor de măsurat.

Astfel pentru montajul aval valoarea efectivă a rezistenței se determină cu relația:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}}, \quad (4-11)$$

iar pentru montajul amonte:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U - R_A I}{I} = \frac{U}{I} - R_A. \quad (4-12)$$

Dacă nu se cunosc caracteristicile aparatelor de măsurat și valoarea rezistenței măsurate se determină din raportul indicațiilor voltmetrului și ampermetrului $R_m = \frac{U}{I}$, rezultatul măsurării este afectat de o eroare sistematică relativă.

Eroarea sistematică relativă este determinată de raportul dintre rezistența de măsurat și valoarea rezistențelor interne ale aparatelor folosite; ea este cu atât mai mică, în cazul montajului aval, cu cât rezistența de măsurat R_x este mai mică în comparație cu rezistența R_v a voltmetrului, iar în cazul montajului amonte, cu cât rezistența de măsurat R_x este mai mare în comparație cu rezistența R_A a ampermetrului. Rezultă că atunci când nu se cunosc rezistențele interne ale aparatelor de măsurat pentru a obține o valoare măsurată $R_m = \frac{U}{I}$ cât mai apropiată de valoarea adevărată, rezistențele mici (sub 1Ω) se măsoară cu montajul aval, iar rezistențele mijlocii (pînă la $10^5 \Omega$) și mari (peste $10^6 \Omega$), cu montajul amonte.

Precizia măsurării rezistențelor prin metoda ampermetrului și voltmetrului este limitată de erorile aparatelor utilizate; de obicei ea este mai mică de 1%.

D. MĂSURAREA REZISTENȚELOR FOARTE MICI

Rezistențele foarte mari sînt rezistențele a căror valoare este mai mare de $1M\Omega$. Astfel de rezistențe au semiconductoarele și dielectricii. Cum acestea din urmă se folosesc în tehnică ca materiale electroizolante, rezistențele foarte mari se cunosc mai ales sub numele de *rezistențe de izolație*. La aceste corpuri curentul poate trece fie prin masa materialului, fie pe la suprafața sa; de aceea se deosebesc două feluri de rezistențe de izolație: *rezistența interioară* (sau *de volum*) care se raportează la 1 cm^3 de material și *rezistența de suprafață* (*superficială*) care se raportează la 1 cm^2 de suprafață a materialului.

Rezistențele de izolație nu sînt constante, valoarea lor variind cu tensiunea aplicată, temperatura și umiditatea materialului (rezistența de izolație scade

cînd unul din acești parametri crește). De aceea la măsurarea rezistențelor de izolație trebuie să se țină seama de valorile tensiunii, temperaturii și umidității sub care se execută măsurarea.

Rezistențele de izolație se măsoară în laborator prin metoda galvanometrului sau prin metoda substituției, iar în practica industrială, cu aparate numite ohmmetre, megohmmetre etc., care sînt aplicația industrială a metodei galvanometrului.

1. METODA GALVANOMETRULUI

Metoda galvanometrului constă în măsurarea curentului de volum care trece prin masa rezistenței de măsurat sau a curentului superficial pe la suprafața sa, cînd rezistența de măsurat este supusă unei tensiuni continue U .

În figura 4-7 este reprezentat montajul pentru măsurarea rezistenței interioare de volum a unei plăci de material izolant prin metoda galvanometrului. În acest montaj E este o sursă de tensiune continuă de 100—1 000 V (baterie de elemente uscate sau redresor); G — un galvanometru de mare sensibilitate ($10^{-10} A/mm$) prevăzut cu un șunt universal S pentru extinderea domeniului de măsurare; R_0 — o rezistență etalon (0,1—1 M Ω) pentru protecția și etalonarea galvanometrului; K_1 și K_2 — întrerupător și comutator; R_x — placa de material electroizolant prinsă între doi electrozi P_1 și P_2 . Pentru ca galvanometrul să măsoare numai curentul de volum prin masa rezistenței de măsurat, în jurul electrodului P_1 , se așează un electrod auxiliar în formă de inel P , legat prin firul f direct la sursă, la același pol la care este legat și electrodul P_1 . În felul acesta între electrozii P și P_1 neexistînd diferență de potențial nu există nici curenți superficiali, iar curenții superfi-

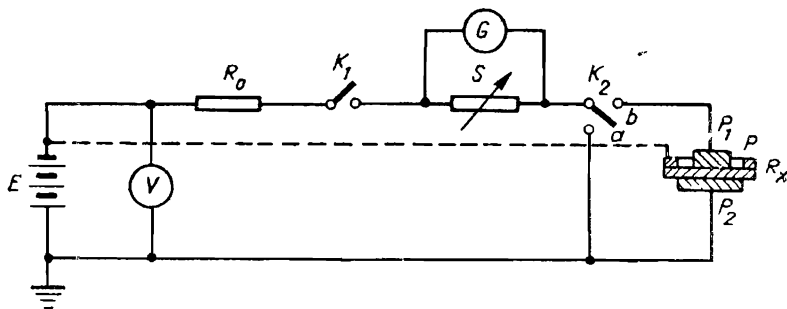


Fig. 4—7. Schema de măsurare a rezistențelor de izolație prin metoda galvanometrului.

ciali dintre electrozii P_2 și P se închid în circuitul bateriei fără a mai trece prin galvanometru.

Măsurarea se efectuează în modul următor: fixînd șuntul în poziție de sensibilitate minimă și comutatorul K_2 pe poziția a se închide întrerupătorul K_1 și apoi se variază șuntul pînă cînd deviația α_0 a galvanometrului

este suficient de mare. În acest caz, neglijînd rezistența galvanometrului și a șuntului, curentul care trece prin circuit are valoarea:

$$I_0 = C_I n_0 \alpha_0 = \frac{U}{R_0}, \quad (4-13)$$

în care: C_I este constanta de curent a galvanometrului;

n_0 — factorul de multiplicare a șuntului;

U — tensiunea indicată de voltmetru.

Se mută apoi comutatorul K_2 pe poziția b , introducîndu-se prin aceasta și rezistența de izolație de volum R_x în circuit. Deviația galvanometrului se micșorează de la α_0 la α_x datorită scăderii intensității curentului.

Se variază sensibilitatea șuntului S corespunzător unui alt factor de multiplicare n_x , pentru a se obține o deviație a galvanometrului α_x cît mai apropiată de α_0 ($\alpha_x \cong \alpha_0$ este condiția necesară ca în cele două determinări constanta de curent a galvanometrului C_I să fie aceeași, deoarece aceasta nu este riguros constantă, ci variază în lungul scării).

În acest caz, curentul de volum I_x este:

$$I_x = C_I n_x \alpha_x = \frac{U}{R_0 + R_x}. \quad (4-14)$$

Din aceste două relații se obține expresia rezistenței de izolație de volum R_x :

$$R_x = R_0 \left(\frac{n_0 \alpha_0}{n_x \alpha_x} - 1 \right), \quad (4-15)$$

Deoarece curentul I_x care trece prin rezistența R_x sub acțiunea tensiunii aplicate U este variabil și scade cu timpul, tinzînd către o valoare constantă, citirea deviației galvanometrului α_x se face numai după trecerea unui anumit interval de timp, care convențional s-a stabilit la un minut.

2. METODA SUBSTITUȚIEI

Metoda substituției este asemănătoare cu metoda precedentă, montajul avînd aceleași elemente componente, cu deosebirea că rezistența de izolație de măsurat R_x și rezistența etalon R_0 în acest caz se leagă în paralel (fig.4-8).

Fixînd șuntul pe poziția de sensibilitate minimă și comutatorul K_2 pe poziția a , se închide întrerupătorul K_1 și apoi se variază șuntul pînă cînd galvanometrul capătă o deviație convenabilă α_x . În acest caz, curentul de volum I_x care trece prin circuit are valoarea:

$$I_x = C_I n_x \alpha_x = \frac{U}{R_x + \frac{R_G S_x}{R_G + S_x}} \cong \frac{U}{R_x},$$

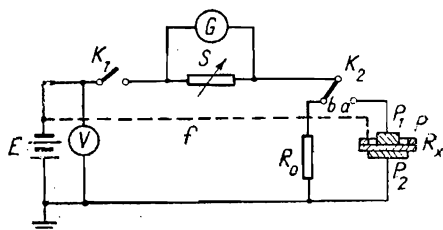


Fig. 4—8. Schema de măsurare a rezistențelor de izolație prin metoda substituției.

în care: C_I este constanta de curent a galvanometrului;

U — tensiune aplicată circuitului;

R_x — rezistența de măsurat;

R_G — rezistența proprie a galvanometrului;

S_x — rezistența șuntului, corespunzătoare factorului de multiplicare n_x .

Mutîndu-se apoi comutatorul K_2 pe poziția b , se variază șuntul S , pentru a se obține o deviație a galvanometrului α_0 cît mai apropiată de α_x . Curentul în acest caz are valoarea:

$$I_0 = C_I n_0 \alpha_0 = \frac{U}{R_0 + \frac{R_G S_0}{R_G + S_0}} \simeq \frac{U}{R_0},$$

în care: R_0 este valoarea rezistenței etalon și S_0 -rezistența șuntului corespunzător unui alt factor de multiplicare n_0 .

În ambele relații s-a neglijat rezistența echivalentă a galvanometrului și a șuntului, datorită valorii ei foarte mici față de rezistențele R_x și R_0 .

Împărțind cele două relații între ele, se obține valoarea rezistenței de măsurat:

$$R_x = R_0 \frac{n_0 \alpha_0}{n_x \alpha_x}, \quad (4-18)$$

E. MĂSURAREA REZISTENȚELOR CU APARATE INDICATOARE

Aparatele folosite pentru măsurarea directă a rezistențelor se numesc *ohmmetre* sau *megohmmetre*. Principiul lor de funcționare se bazează pe aplicarea legii lui Ohm. De aceea ohmmetrele se compun dintr-o sursă de curent continuu, care poate fi o baterie uscată sau un mic generator de curent continuu cu magnet permanent (magnetou) și un aparat indicator magneto-electric.

Constructiv, se deosebesc două categorii de ohmmetre: ohmmetre ale căror indicații depind de tensiunea sursei de alimentare și ohmmetre ale căror indicații nu depind de această tensiune.

a. Ohmmetrele ale căror indicații depind de tensiunea sursei de alimentare au ca aparat indicator un aparat magnetoelectric obișnuit, care poate fi un ampermetru sau un galvanometru (aparate ale căror indicații variază cu tensiunea la bornele sursei). Acestea pot fi executate cu montaj în serie sau cu montaj în paralel, diferența dintre ele constînd doar în modul în care este legată rezistența de măsurat față de aparatul indicator.

Ohmmetrul cu montaj în serie are aparatul indicator legat în serie cu rezistența de măsurat R_x și cu o rezistență adițională R (fig. 4-9, *a*). Ca urmare, în momentul în care rezistența de măsurat R_x este egală cu zero (adică bor-

nele ohmmetrului sînt scurtcircuitate), aparatul indicator va avea deviația maximă și deci scara aparatului gradată în ohmi are sens invers, (deviația acului este cu atît mai apropiată de zero cu cît rezistența la borne este mai mare).

Pentru măsurarea unei rezistențe cu acest ohmmetru, în primul rînd se scurtcircuitează bornele aparatului, închizînd întrerupătorul K , apoi se aduce acul la gradația zero a scării, cu ajutorul unui șunt magnetic al aparatului. Se leagă rezistența de măsurat la bornele ohmmetrului și se citește valoarea în ohmi pe scara gradată a aparatului.

Cînd în urma variației șuntului magnetic acul nu se poate totuși aduce la zero, bateria trebuie schimbată.

Ohmmetrul cu montaj în serie se utilizează la măsurarea rezistențelor mari.

Ohmmetrul cu montaj în paralel (fig. 4-9, *b*) are aparatul indicator legat în paralel cu rezistența de măsurat. Spre deosebire de montajul în serie, în acest caz aparatul indicator are deviația maximă (diviziunea ∞) cînd rezistența de măsurat are valoarea infinită, adică atunci cînd la bornele aparatului nu este conectată nici o rezistență și deci tot curentul trece prin aparatul de măsurat. Indicația zero a aparatului corespunde valorii zero a rezistenței de măsurat, adică atunci cînd bornele aparatului sînt scurtcircuitate. În consecință, scara aparatului, gradată în ohmi, are sensul normal.

Măsurarea rezistențelor cu ohmmetrul cu montaj în paralel se face în același mod ca și în cazul ohmmetrului cu montaj în serie. Reglarea aparatului se face cu întrerupătorul K deschis, aducînd acul indicator la diviziunea ∞ a scării, cu ajutorul șuntului magnetic al aparatului.

Ohmmetrul cu montaj în paralel se folosește la măsurarea rezistențelor mici (zeci sau sute de ohmi).

b. Ohmmetrele ale căror indicații nu depind de tensiunea sursei de alimentare au aparatul indicator de tipul logometrelor magneto-electrice. La aceste aparate rezistența de măsurat R_x se conectează fie în serie (fig. 4-10, *a*), fie în paralel (fig. 4-10, *b*) cu una din bobinele mobile ale logometrului. Ca urmare, curentul prin una din bobinele mobile ale logometrului depinde de valoarea rezistenței de măsurat, curentul prin cealaltă bobină fiind independent de aceasta.

Deviația logometrului este determinată de raportul curenților prin cele două bobine. Ambii curenți fiind proporționali cu tensiunea sursei, raportul lor nu depinde de aceasta:

$$\alpha = f \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = f \left(\frac{R_2 + R_x}{R_1 + R_0} \right) = f(R_x), \quad (4-19)$$

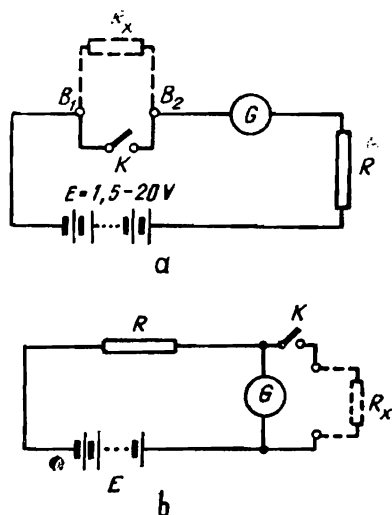


Fig. 4—9. Schemele ohmmetrelor ale căror indicații depind de tensiunea sursei de alimentare.

unde: R_1 și R_2 sînt rezistențele bobinelor mobile și R_0 — o rezistență de protecție.

Indicațiile ohmmetrului sînt deci funcție numai de rezistența de măsurat, fiind independente de tensiunea sursei, adică de viteza de rotație a mani-

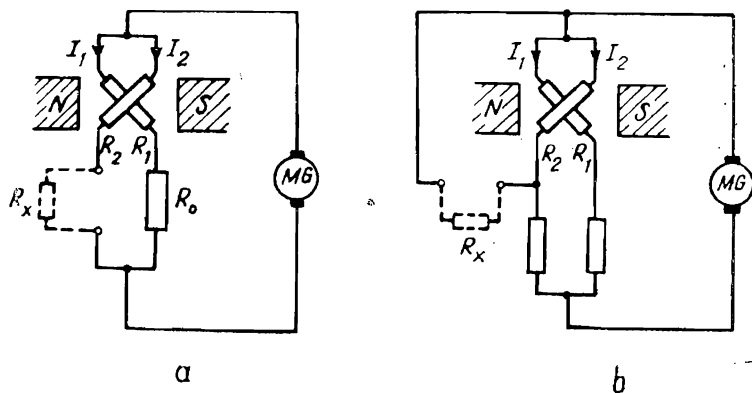


Fig. 4—10. Schemele ohmmetrelor ale căror indicații nu depind de tensiunea sursei de alimentare.

velei inductorului. Ca urmare, aceste ohmmetre nu necesită nici o reglare prealabilă măsurării.

Ohmmetrele cu montaj în paralel se folosesc pentru măsurarea rezistențelor mici, iar cele cu montaj în serie, pentru măsurarea rezistențelor mari (de ordinul megohmilor), din care cauză se mai numesc și megohmmetre.

F. DETERMINAREA LOCULUI DE DETERIORARE A IZOLAȚIEI UNUI CABLU

Pentru a determina locul de deteriorare a izolației unui cablu se folosesc diferite metode. Una dintre metodele cele mai des folosite este metoda *buclei*. Această metodă permite să se determine locul deteriorării izolației în cazurile cînd străpungerea s-a produs între conductoarele cablului și armătură sau între două conductoare ale unui cablu cu trei conductoare. Determinarea precisă a locului de defect se face dacă rezistența locului de străpungere este mică, de cel mult 1 000 Ω . Metoda buclei formate din conductoarele cablului reprezintă o aplicație a schemei punții (fig. 4—11).

Pentru a determina locul de defect, capetele conductoarelor cablului *B* și *C* se leagă împreună. La celelalte două capete *A* și *D* se conectează un galvanometru cu cutiile de rezistențe R_1 și R_2 . Uneori cutiile de rezistențe, ca și la puntea cu cursor, se înlocuiesc cu o sîrmă calibrată împărțită în două

cu ajutorul unui contact mobil. Clema care face legătura între cutiile de rezistență (sau contactul mobil) se leagă prin rezistența de protecție R cu bateria și la pământ.

Rezistența unuia dintre conductoarele cablului se notează R_L , iar rezistența porțiunii de cablu dintre punctul de deteriorare și capătul D cu R_x .

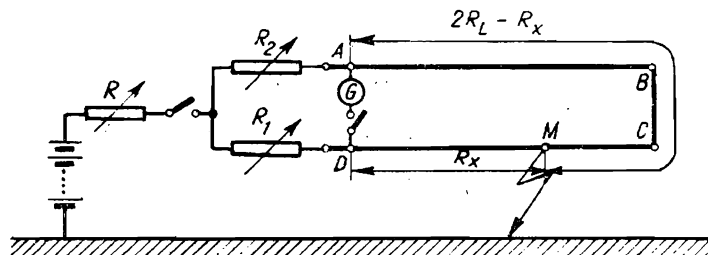


Fig. 4—11. Schema de determinare a locului de deteriorare a unui cablu prin metoda buclei.

Dacă întrerupătoarele sînt închise și acul galvanometrului nu deviază, se poate scrie, la fel ca în cazul punții Wheatstone:

$$\frac{R_1}{R_2} = K = \frac{R_x}{2R_L - R_x},$$

de unde:

$$R_x = 2R_L - \frac{K}{1 + K}. \quad (4-20)$$

Calculînd pe R_x și cunoscînd rezistența specifică ρ a materialului, precum și secțiunea q a cablului, se poate determina distanța L_x de la capătul D pînă la punctul de deteriorare a izolației, folosind relația:

$$L_x = R_x \frac{q}{\rho}. \quad (4-21)$$

Dacă secțiunea cablului este aceeași pe toată lungimea acestuia, în formula folosită pentru determinarea lui R_x se poate înlocui R_x și R_L cu lungimea, secțiunea și rezistența specifică a conductoarelor. În acest caz se obține:

$$\rho \frac{L_x}{q} = 2\rho \frac{L}{q} \frac{K}{1 + K},$$

de unde:

$$L_x = 2L \frac{K}{1 + K}. \quad (4-22)$$

Pentru a se evita erorile mari de măsurare, este necesar ca rezistențele de contact și rezistențele conductoarelor de legătură între capetele cablului și cutiile de rezistență să fie cît mai mici.

Capitolul V

MĂSURAREA INDUCTANȚELOR ȘI CAPACITĂȚILOR

A. MĂSURAREA INDUCTANȚELOR

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI VOLTMETRULUI

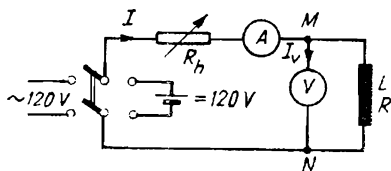
Pentru măsurarea inductanțelor prin metoda ampermetrului și voltmetrului se poate folosi atât montajul amonte cât și montajul aval. În general se folosește montajul aval (fig. 5-1).

Știind că valoarea inductanței este dată de relația:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad (5-1)$$

în care Z este impedența bobinei a cărei inductanță se măsoară; R — rezistența acesteia măsurată în curent continuu, iar $\omega = 2\pi f$ (f fiind frecvența tensiunii sinusoidale de alimentare), metoda de măsurare constă în determinarea impedenței Z a bobinei și a rezistenței R . În acest scop se face mai întâi o măsurare pentru determinarea impedenței Z , alimentând montajul în curent alternativ.

Dacă U și I sînt valorile tensiunii și curentului măsurate de voltmetru și ampermetru, iar I_v este curentul absorbit de voltmetru (considerat fără inductanță, de exemplu, voltmetrul termic cu fir cald), impedența Z a bobinei se calculează cu expresia:



$$Z^2 = \frac{U(U + 2RI_v)}{I^2 - I_v^2}. \quad (5-2)$$

Fig. 5—1. Metoda ampermetrului și voltmetrului pentru măsurarea inductanțelor.

Valoarea rezistenței R se obține făcînd o a doua măsurare cu montajul alimentat în curent continuu.

2. METODE DE PUNTE.

a) **Punțile de curent alternativ.** Pentru măsurarea inductanțelor prin metode de punte se utilizează puntea de curent alternativ.

Schema unei punți de curent alternativ este reprezentată în figura 5-2; cele patru brațe sînt formate din patru impedanțe Z_1, Z_2, Z_3 și Z_4 . La punctele A și B se conectează sursa de curent alternativ, iar la punctele C și D , aparatul indicator de zero.

La echilibru, la fel ca și la puntea de curent continuu, căderile de tensiune în brațele AC și AD sînt egale; la fel și în brațele BC și BD . Folosind notațiile vectoriale utilizate în curent alternativ, aceste egalități se pot scrie:

$$\begin{aligned} I_1 \bar{Z}_1 &= I_2 \bar{Z}_2; \\ I_1 \bar{Z}_3 &= I_2 \bar{Z}_4 \end{aligned} \quad (5-3)$$

Împărțind aceste egalități, se obțin condițiile de echilibru ale punții de curent alternativ:

$$\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_3} = \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_4} \quad (5-4)$$

sau:

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_3, \quad (5-5)$$

de unde:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (\text{condiția de modul}); \quad (5-6)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (\text{condiția de fază}), \quad (5-7)$$

în care: Z_1, Z_2, Z_3 , și Z_4 sînt modulele impedanțelor brațelor; iar $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ și φ_4 — defazajele curentului față de tensiunea în brațele corespunzătoare (argumentele).

Din condițiile de echilibru rezultă că pentru echilibrarea punților de curent alternativ este necesar să se realizeze egalitatea produselor modulelor impedanțelor din brațele opuse, precum și egalitatea sumelor argumentelor lor.

De obicei nu toate brațele punților de curent alternativ sînt formate din impedanțe.

O largă răspîndire au căpătat punțile la care două din brațele lor sînt formate din rezistențe pur active, iar celelalte două brațe, din impedanțele de comparație. În acest caz, din condiția de fază (5-7) pentru obținerea echilibrului rezultă următorul mod de alcătuire a punților. Dacă rezistențele pur active sînt conectate în două brațe alăturate (adică $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$), atunci

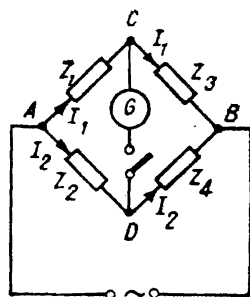


Fig. 5-2. Schema generală a punților de curent alternativ.

în celelalte două brațe alăturate trebuie conectate impedanțe de același fel (ambele inductive sau ambele capacitive), pentru ca argumentele φ_3 și φ_4 să fie de același semn ($\varphi_4 = \varphi_3$) (fig. 5-3, *a* și *b*). Dacă rezistențele active sînt conectate în brațe opuse (adică $\varphi_1 = \varphi_4 = 0$), în celelalte brațe opuse

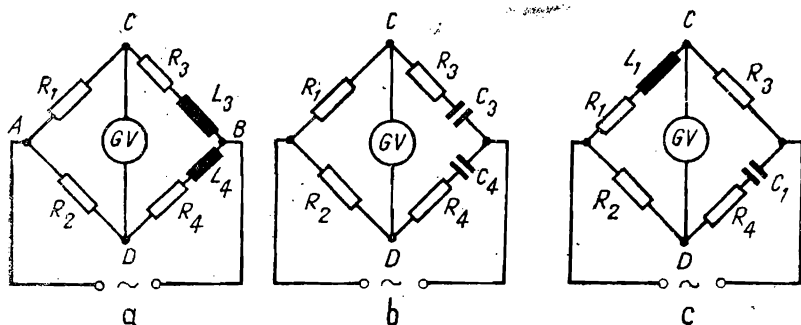


Fig. 5—3. Schemele punților de curent alternativ.

pentru ca $\varphi_2 + \varphi_3 = 0$, adică $\varphi_2 = -\varphi_3$, trebuie conectate impedanțe cu caracter diferit, adică dacă într-un braț este o impedanță inductivă, în cel opus trebuie să fie impedanță capacitivă și invers (fig. 5-3, *c*).

În funcție de elementele care furnizează brațele punților în condițiile de echilibru poate sau nu să intervină frecvența sursei de alimentare. În caz că în condițiile de echilibru intervine frecvența sursei de alimentare, echilibrarea punții obținută pentru o anumită frecvență nu se păstrează la schimbarea acesteia, motiv pentru care este necesar ca alimentarea să se facă de la o sursă cu frecvență stabilă.

Schemele punților de curent alternativ sînt destul de variate. Se deosebesc patru categorii principale de punți: punți pentru comparația unei inductanțe cu altă inductanță (punți *L-L*), punți pentru comparația unei capacități cu altă capacitate (punți *C-C*), punți pentru comparația unei inductanțe cu o capacitate sau invers (punți *L-C*) și punți combinate. Dintre acestea se preferă punțile care folosesc pentru comparație etaloane de capacități deoarece sînt mult mai ușor de realizat și sînt mai constante în timp decât etaloanele de inductanță.

Alimentarea punților de curent alternativ, în cazurile cînd măsurarea se efectuează la frecvența industrială de 50 Hz, se face de la rețeaua de curent alternativ, de obicei prin intermediul unui transformator. În acest caz, ca aparat de zero se folosește galvanometrul de vibrații.

Pentru mărirea preciziei de măsurare, punțile de curent alternativ se alimentează de la surse de curent de frecvență înaltă. Surse de curent de frecvență mare pot fi vibratorul electromagnetic (de frecvență 800—1 000 Hz), generatoarele de înaltă frecvență sau oscilatoarele electronice. Cele mai răspîndite sînt oscilatoarele electronice (de frecvență 20 — 10 000 Hz), care furnizează o curbă de tensiune de formă practic sinusoidală și asigură o stabilitate mare a frecvenței.

Ca aparate de zero pentru audiofrecvențe se folosesc casca telefonică, aparatele de zero cu tuburi electronice indicatoare. Casca telefonică are o largă utilizare în punțile de curent alternativ, echilibrul acestora corespunzând sunetului minim. Casca telefonică este un detector sensibil de curent alternativ pentru frecvențe cuprinse între 300 și 6 000 Hz, sesizând în această bandă de frecvență curenți foarte mici (circa $1 \mu\text{A}$). Maximum de sensibilitate a căștii telefonice corespunde frecvențelor cuprinse între 700 și 1 000 Hz.

b) **Puntea Maxwell cu inductanță variabilă.** În figura 5-4 este redată schema punții Maxwell pentru determinarea inductanței prin comparație cu inductanța unei bobine etalon variabilă. Puntea este alcătuită din rezistențele pure active R_1 , R_2 și R , bobina a cărei inductanță se măsoară L_x (de rezistență R_x) și bobina de inductanță etalon variabilă L_0 (de rezistență R_0).

Rezistența R este necesară pentru realizarea echilibrului punții. Fără aceasta echilibrul se obține numai dacă rezistențele și inductanțele bobinelor de măsurat și etalon sînt în același raport ($\frac{R_x}{R_0} = \frac{L_x}{L_0}$), lucru care nu se îndeplinește aproape niciodată. În funcție de mărimea raportului $\frac{R_x}{R_0} = \frac{L_x}{L_0}$, rezistența R se poate introduce în serie fie cu bobina de măsurat L_x , fie cu bobina etalon L_0 . Echilibrul punții nu se poate obține decît în una din aceste posibilități.

Dacă pentru obținerea echilibrului este necesară conectarea rezistenței R în serie cu bobina de măsurat L_x condiția generală de echilibru a punții de curent alternativ devine:

$$R_1 (R_0 + j\omega L_0) = R_2 (R + R_x + j\omega L_x). \quad (5-8)$$

Din această relație, egalînd părțile reale și părțile imaginare, se obține:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R + R_x}{R_0} \quad \text{și} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_x}{L_0}. \quad (5-9)$$

Din egalitatea a doua se deduce valoarea inductanței:

$$L_x = L_0 \frac{R_1}{R_2} \quad (5-10)$$

La conectarea rezistenței R în serie cu bobina etalon L_0 , la echilibru, din condiția generală a punții, se obține:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_0 + R} \quad \text{și} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_x}{L_0}, \quad (5-11)$$

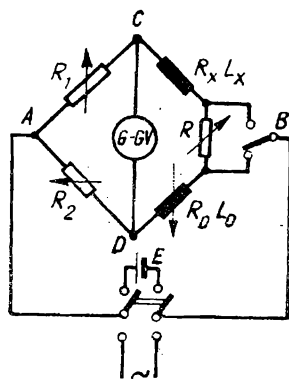


Fig. 5-4. Puntea Maxwell cu inductanță variabilă.

iar valoarea inductanței este:

$$L_x = L_0 \frac{R_1}{R_2}. \quad (5-12)$$

Din condițiile de echilibru ale punții se observă că echilibrul punții necesită un dublu reglaj, pentru a fi respectate în același timp egalitățile ambelor rapoarte. Aceasta se obține prin reglări succesive ale rezistențelor R_1 , R_2 și R și a bobinei de inductanță etalon variabilă L_0 . Operația se efectuează atât în curent continuu (pentru raportul $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R + R_x}{R_0}$) cât și în curent alternativ (pentru raportul $\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_x}{L_0}$).

Echilibrarea se face astfel: se alimentează mai întâi puntea în curent continuu și luând un anumit raport $\frac{R_1}{R_2}$ se obține echilibrul cu un galvanometru magnetoelectric, variind rezistența R . Se alimentează apoi puntea în curent alternativ și pentru același raport $\frac{R_1}{R_2}$ se obține echilibrul cu un galvanometru de vibrații, variind inductanța bobinei etalon L_0 . Se trece apoi la o nouă echilibrare în curent continuu și iar în curent alternativ, astfel încât după câteva reglări succesive puntea rămâne în echilibru atât în curent continuu cât și în curent alternativ.

c) **Puntea Maxwell cu condensator etalon variabil.** În figura 5-5 este redat montajul acestei punți în care R_0 , R_1 și R_2 sînt rezistențe de precizie neinductive și variabile, L_x — bobina a cărei inductanță se măsoară, iar C_0 — condensatorul etalon. Condensatorul este pus în paralel cu o rezistență R_0 , deoarece totdeauna bobina a cărei inductanță se măsoară are și o oarecare rezistență ohmică R_x (presupusă în serie).

La echilibru, conform condiției generale de echilibru a punților de curent alternativ ($Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$), rezultă că:

$$(R_x + j\omega L_x) \frac{R_0}{1 + j\omega C_0 R_0} = R_1 R_2. \quad (5-13)$$

Egalînd părțile reale și părțile imaginare, se obține:

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_1}{R_0} \quad \text{și} \quad \frac{L_x}{R_2} = R_1 C_0. \quad (5-14)$$

Din cea de-a doua egalitate rezultă valoarea inductanței:

$$L_x = R_1 R_2 C_0. \quad (5-15)$$

Și la această punte echilibrarea se obține prin reglări succesive în curent continuu (cu galvanometru magnetoelectric), luînd un anumit raport $\frac{R_1}{R_0}$ și variînd

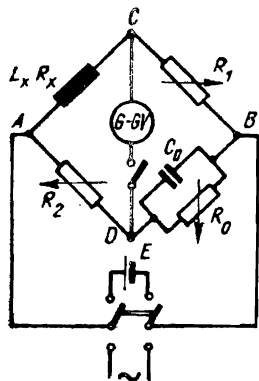


Fig. 5—5. Puntea Maxwell cu condensator etalon variabil.

rezistența R_0 , iar în curent alternativ (cu un galvanometru de vibrații), păstrînd același raport $\frac{R_1}{R_0}$ și variînd capacitatea condensatorului etalon C_0 .

B. MĂSURAREA INDUCTANTELOR MUTUALE

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI VOLTMETRULUI

Pentru măsurarea inductanțelor mutuale prin metoda ampermetrului și voltmetrului se folosește schema din figura 5-6.

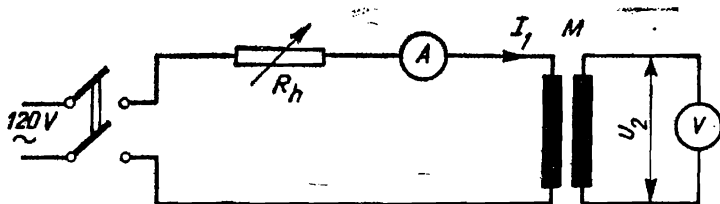


Fig. 5—6. Metoda ampermetrului și voltmetrului pentru măsurarea inductanțelor mutuale.

Dacă printr-una din înfășurările bobinei a cărei inductanță mutuală se măsoară trece curentul alternativ I_1 , iar la bornele celeilalte înfășurări se măsoară forța electromotoare indusă U_2 cu un voltmetru avînd un consum neglijabil, inductanța mutuală M , exprimată în henry, este:

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}. \quad (5-16)$$

2. METODA INDIRECTĂ

Inductanța mutuală se poate determina indirect, măsurînd inductanța ambelor înfășurări ale bobinei, o dată legate în serie și a doua oară în opoziție. Cînd cele două înfășurări sînt legate în serie (fig. 5-7, a), cîmpurile lor se adună și inductanța lor L_1 este:

$$L_I = L_1 + L_2 + 2M, \quad (5-17)$$

unde L_1 și L_2 sînt inductanțele proprii ale înfășurării primare, respectiv secundare.

Cînd cele două înfășurări sînt legate în opoziție (figura 5-7,b), cîmpurile lor se scad și inductanța lor va fi:

$$L_{II} = L_1 + L_2 - 2M. \quad (5-18)$$

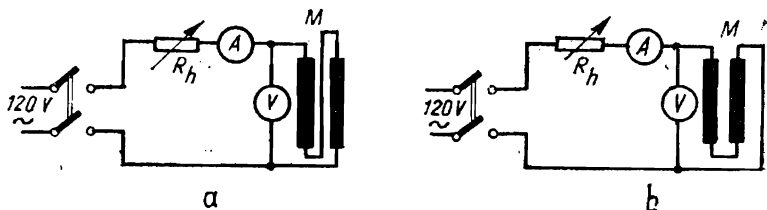


Fig. 5—7. Metoda indirectă de măsurare a inductanțelor mutuale.

Scăzînd a doua ecuație din prima, se obține:

$$L_I - L_{II} = 4M,$$

de unde rezultă relația de calcul a inductanței mutuale:

$$M = \frac{L_I - L_{II}}{4}, \quad (5-19)$$

Inductanțele L_I și L_{II} se determină prin metoda industrială a ampermetrului și voltmetrului sau prin oricare altă metodă de măsurare a inductanțelor.

3. METODA COMPARAȚIEI (metoda Felici)

Inductanța mutuală se poate determina și prin comparație cu inductanța mutuală a unei bobine etalon (metoda Felici). Pentru aceasta se folosește schema din figura 5-8, în care M este bobina a cărei inductanță mutuală se măsoară, M_0 — bobina etalon variabilă și GV — un galvanometru de vibrații sau o cască telefonică. Înfășurările secundare ale celor două bobine fiind legate în opoziție, se variază inductanța mutuală a bobinei etalon pînă cînd în circuitul secundar nu mai circulă nici un curent (galvanometrul de vibrații rămîne la zero). În acest caz, inductanțele mutuale ale celor două bobine sînt egale ($M = M_0$).

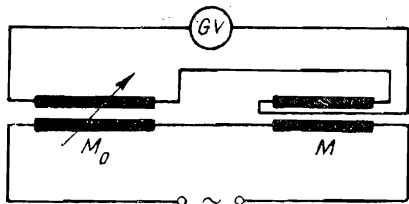


Fig. 5—8. Metoda comparației de măsurare a inductanțelor mutuale.

Prin metoda comparației nu se pot măsura decît inductanțe mutuale mai mici decît inductanța mutuală maximă a bobinei etalon.

4. METODA DE PUNTE

Pentru măsurarea inductanțelor mutuale prin metoda de punte se folosește montajul din figura 5-9. În acest montaj R_2, R_3 și R_4 sînt rezistențe de precizie variabile, C_0 — un condensator etalon, M_x — bobina a cărei inductanță mutuală se măsoară, iar L_1 și R_1 — inductanța proprie și rezistența uneia din cele două înfășurări ale bobinei M_x .

Metoda comportă două etape distincte. În primul rînd se măsoară inductanța L_1 și rezistența R_1 ale uneia din cele două înfășurări ale bobinei M_x , închizînd întrerupătoarele K_1 și K_2 pe poziția 1. Apoi se măsoară inductanța mutuală. Pentru aceasta se trec ambele întrerupătoare pe poziția 2 (prin aceasta se introduce în circuit și înfășurarea primară a bobinei M_x) și se echilibrează puntea în curent alternativ, variînd simultan rezistențele R_2, R_3 și R_4 astfel încît să se păstreze raportul $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$.

La echilibru se poate scrie:

$$\begin{aligned}\bar{E}_1 + I_1 \bar{Z}_1 &= I_2 R_2 \\ I_1 R_3 &= I_2 R_4,\end{aligned}\quad (5-20)$$

unde: $\bar{E}_1 = -j\omega M_x I$ este forța electromotoare indusă în înfășurarea secundară a bobinei de măsurat M_x . Introducînd această valoare a lui E_1 în prima relație și ținînd cont că $I = I_1 + I_2$, se obține:

$$\begin{aligned}I_1 [R_1 + j\omega (L_1 - M_x)] &= I_2 (R_2 + j\omega M_x). \\ I_1 R_3 &= I_2 R_4\end{aligned}\quad (5-21)$$

Împărțind cantitățile între ele, rezultă:

$$M_x = L_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (5-22)$$

C. MĂSURAREA CAPACITĂȚILOR

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI A VOLTMETRULUI

Cea mai simplă metodă pentru măsurarea capacităților este metoda ampermetrului și voltmetrului. Această metodă este însă și cea mai puțin precisă, deoarece la măsurare se neglijează pierderile în dielectricul condensatorului. Metoda se folosește numai la măsurarea capacităților mari.

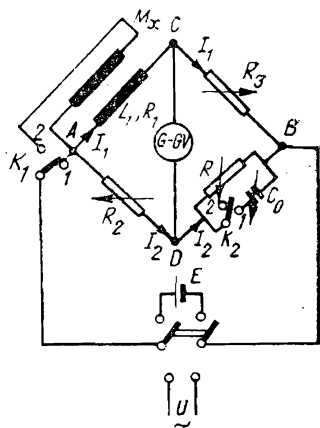


Fig. 5—9. Schema punții pentru măsurarea inductanțelor mutuale.

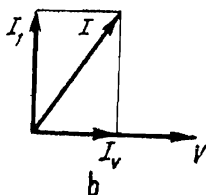
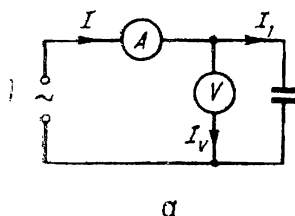


Fig. 5—10. Metoda ampermetrului și voltmetrului pentru măsurarea capacităților:
a — schema; b — diagrama fazorială.

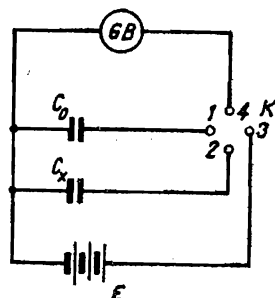


Fig. 5—11. Metoda galvanometrului balistic pentru măsurarea capacităților.

Pentru măsurare se poate folosi atât montajul aval cît și montajul amonte. Pentru montajul aval (fig. 5-10) din indicațiile ampermetrului și ale voltmetrului se deduce reactanța capacitivă:

$$X_c = \frac{U}{I_1} = \frac{U}{\sqrt{I^2 - I_v^2}} = \frac{1}{\omega C_x},$$

de unde se poate determina cu ușurință valoarea capacității:

$$C_x = \frac{\sqrt{I^2 - I_v^2}}{U\omega}, \quad (5-21)$$

făcîndu-se totodată și corecția privind curentul absorbit de voltmetru.

2. METODA GALVANOMETRULUI BALISTIC (METODA COMPARAȚIEI)

Metoda galvanometrului balistic constă din compararea capacității necunoscute C_x cu capacitatea cunoscută C_0 a unui condensator etalon, cu ajutorul unui galvanometru balistic. În figura 5-11 este redată schema montajului, în care: E este sursa de energie (o baterie de acumuloare de 24 V), C_0 — condensatorul etalon, C_x — condensatorul de măsurat, GB — galvanometrul balistic, iar K — un comutator cu godeuri cu mercur.

Măsurarea se face în modul următor: se pune comutatorul K pe poziția 1-3 și se încarcă astfel condensatorul etalon C_0 cu o cantitate de electricitate $Q_0 = C_0 E$; mutînd comutatorul K pe poziția 1-4, se descarcă condensatorul C_0 pe galvanometrul balistic, care capătă o deviație α_0 proporțională cu cantitatea de electricitate $Q_0 = C_b \alpha_0$; trecînd comutatorul K în poziția 2-3, se încarcă condensatorul de măsurat C_x cu o cantitate de electricitate $Q_x = C_x E$; mutînd apoi comutatorul K pe poziția 2-4, se descarcă și condensatorul C_x care produce o deviație α_x a galvanometrului balistic proporțională cu cantitatea de electricitate $Q_x = C_b \alpha_x$.

Împărţind cele două relaţii între ele, se obţine:

$$\frac{Q_x}{Q_0} = \frac{\alpha_x}{\alpha_0} = \frac{C_x}{C_0},$$

de unde:

$$C_x = C_0 \frac{\alpha_x}{\alpha_0}. \quad (5-22)$$

În cazul diferenţelor mari între capacităţile condensatoarelor C_0 şi C_x , deviaţiile galvanometrului α_0 şi α_x fiind mult diferite între ele, introduc erori de determinarea capacităţii condensatorului de măsurat, datorită variaţiei constantei galvanometrului balistic C_b în lungul scării gradate. De aceea în practică trebuie ca deviaţiile α_x şi α_0 să fie cât mai apropiate. Acest lucru se poate realiza prin diferite mijloace. Unul dintre acestea constă din încărcarea cu tensiuni diferite a condensatoarelor C_x şi C_0 . Cel mai recomandabil mijloc este însă cel folosit în schema reprezentată în figura 5-12 care constă din şuntarea galvanometrului pe o rezistenţă constantă R şi legarea condensatorului de capacitate mai mare la un punct variabil de-a lungul acestei rezistenţe. În felul acesta, la descărcarea condensatorului de capacitate mai mică (în cazul de faţă C_x) galvanometrul balistic este montat în paralel cu întreaga rezistenţă R a şuntului, iar la descărcarea condensatorului de capacitate mai mare (în cazul de faţă C_0) este montat în paralel numai cu o mică porţiune r a şuntului. Acest lucru permite ca prin variaţia rezistenţei porţiunii de şunt r să se obţină deviaţii α_x şi α_0 cât mai apropiate.

În acest caz cantitatea de electricitate aplicată la bornele galvanometrului balistic cu şunt se ramifică prin galvanometru şi prin şunt în părţi invers proporţionale cu rezistenţele acestora, deci deviaţiile α_x şi α_0 ale galvanometrului sînt proporţionale cu cantităţile de electricitate q şi respectiv q_0 care trec prin aceasta:

$$q_x = Q_x \frac{R}{R + R_G} = C_x E \frac{R}{R + R_G} = C_b \alpha_x \quad (5-23)$$

$$q_0 = Q_0 \frac{r}{R + R_G} = C_0 E \frac{r}{R + R_G} = C_b \alpha_0, \quad (5-24)$$

unde: R_G este rezistenţa galvanometrului balistic. În ambele relaţii constanta galvanometrului balistic C_b are aceeaşi valoare, deoarece în ambele cazuri galvanometrul balistic este închis pe aceeaşi rezistenţă şi deviaţiile α_x şi α_0 sînt aproximativ egale.

Împărţind relaţiile (5-23) şi (5-24) între ele, se obţine:

$$\frac{C_x R}{C_0 r} = \frac{\alpha_x}{\alpha_0},$$

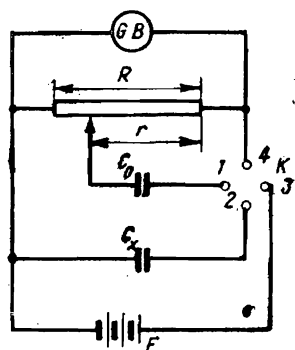


Fig. 5—12. Metoda galvanometrului balistic perfecţionată pentru măsurarea capacităţilor.

de unde:

$$C_x = C_0 \frac{r}{R} \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_0}. \quad (5-25)$$

Modul de lucru este același ca și la montajul precedent, cu deosebire că de data aceasta se urmărește ca cele două deviații α_x și α_0 să fie egale, variind în acest scop valoarea r a porțiunii de șunt.

Pentru mărirea preciziei, măsurarea se repetă de cîteva ori și se calculează valoarea medie a rezultatelor obținute. Eroarea metodei galvanometru-lui balistic este, în general, sub 2-3%.

3. METODE DE PUNTE

La măsurarea capacității condensatoarelor cu dielectric solid este necesar să se țină seama de faptul că dielectricul are o rezistență finită, deoarece, sub influența tensiunii aplicate în el, apar un curent de conductibilitate și un curent de deplasare, precum și pierderi prin histerezis dielectric. Curentul în circuitul unui asemenea condensator nu este în avans față de tensiune cu un unghi de 90° , ci cu unul mai mic $\left[\varphi = - \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \right]$. Unghiul δ complementar unghiului de decalaj dintre curent și tensiune se numește *unghiul de pierderi* al condensatorului. Din această cauză condensatorul real se reprezintă în schemele echivalente sub forma unei capacități ideale C (fără pierderi în dielectric) conectată în paralel (v. fig. 1-11,a) sau în serie (v. fig. 1-11,b) cu o rezistență activă R_d echivalentă pierderilor. În primul caz, tangenta unghiului de pierderi este dată de relația:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R_d C \omega}, \quad (5-26)$$

iar în cazul al doilea, de relația:

$$\operatorname{tg} \delta = R_d C \omega. \quad (5-27)$$

Schemele de punte folosite pentru determinarea capacităților țin seama de acest lucru. La măsurarea capacității condensatoarelor fără pierderi în dielectric, unghiul de pierderi fiind egal cu zero se pot obține condițiile de echilibru ale punții comparînd condensatorul de măsurat cu un condensator etalon (la care pierderile sînt practic zero), deoarece argumentele lor sînt egale cu $\frac{\pi}{2}$. La măsurarea capacității condensatoarelor cu pierderi în dielectric echilibrarea punții nu se poate realiza cu o astfel de schemă, deoarece nu se poate obține condiția de fază, din cauză că argumentul condensatorului de măsurat fiind mai mic de 90° $\left[\varphi = - \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \right]$ este diferit de cel al condensatorului etalon.

În acest caz, pentru a realiza echilibrarea punții, este necesar fie să se micșoreze argumentul brațului de punte al condensatorului etalon de comparație, conectînd în serie sau în paralel cu acesta o rezistență activă, fie să se facă diferit de zero argumentul unuia dintre brațele formate din rezistențe pur active, conectînd în serie sau în paralel cu rezistența o reactanță (inductivă sau capacitivă, depinzînd de brațul punții în care se introduce).

a) **Puntea Sauty.** Capacitatea condensatoarelor fără pierderi în dielectric (condensatoare avînd drept dielectric aerul) se determină cu puntea Sauty, comparînd condensatorul de măsurat cu un condensator etalon variabil.

În figura 5-13 este reprezentată schema punții Sauty, în care R_1 și R_2 sînt rezistențe de precizie variabile, C_x — condensatorul de măsurat care se compară cu condensatorul etalon C_0 , iar T — o cască telefonică care servește drept aparat indicator de zero.

Condiția generală de echilibru a punților de curent alternativ $\bar{Z}_1 \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_3$ aplicată în cazul punții Sauty ia forma:

$$-R_1 \frac{j}{C_0 \omega} = -R_2 \frac{j}{C_x \omega},$$

de unde se obține:

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_0. \quad (5-28)$$

Se observă că relația de condiție este independentă de frecvență, deci puntea poate fi alimentată atît în curent alternativ cît și în curent continuu.

Cînd puntea este alimentată în curent alternativ (cu ajutorul unui vibrator de circa 800 Hz), echilibrul poate fi obținut în două moduri: fie luînd un raport constant pentru raportul $\frac{R_2}{R_1}$ și variînd capacitatea condensatorului etalon C_0 ; fie păstrînd capacitatea condensatorului etalon fixă, se dă o anumită valoare rezistenței R_1 și se variază rezistența R_2 pînă la obținerea sunetului minim în casca telefonică.

La alimentarea în curent continuu se folosește ca aparat indicator de zero un galvanometru balistic. Pentru obținerea echilibrului, încărcînd condensatoarele C_x și C_0 și descărcîndu-le în galvanometrul balistic (prin închiderea întrerupătorului K_1), se variază rezistența R_1 pînă ce indicatorul galvanometrului rămîne nemișcat.

b) **Puntea Wien.** Pentru măsurarea capacității condensatoarelor cu pierderi mici în dielectric se folosește puntea Wien, care diferă de puntea Sauty prin aceea că în brațul condensatorului etalon este conectată în serie o rezistență de precizie variabilă R_0 , de valoare mică, pentru a crea o impedanță similară cu cea din brațul condensatorului de măsurat C_x (figura 5-14).

Relația de echilibru pentru această punte este următoarea:

$$R_1 \left(R_0 - \frac{j}{C_0 \omega} \right) = R_2 \left(R_x - \frac{j}{C_x \omega} \right), \quad (5-29)$$

unde s-a notat cu R_x rezistența echivalentă pierderilor în condensatorul de măsurat, considerată în serie cu acesta. Din această relație, egalînd părțile reale și imaginare, rezultă:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} \quad \text{și} \quad C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (5-30)$$

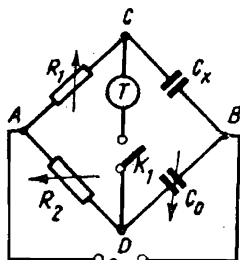


Fig. 5-13. Schema punții Sauty.

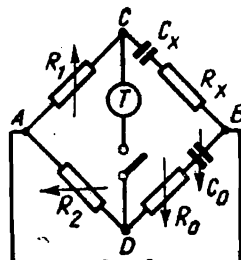


Fig. 5-14. Schema punții Wien.

Tangenta unghiului de pierderi este:

$$\operatorname{tg} \delta_x = R_x C_x \omega = R_0 \frac{R_1}{R_2} C_0 \frac{R_2}{R_1} \omega = R_0 C_0 \omega. \quad (5-31)$$

Se observă că și la această punte condițiile de echilibru sînt independente de frecvență.

Echilibrarea punții se face astfel: fixînd mai întîi rezistența R_0 la zero, se obține sunetul minim în casca telefonică procedînd la fel ca la echilibrarea punții Sauty. După aceasta se trece la reglarea rezistenței R_0 , tinzîndu-se la micșorarea în continuare a sunetului în casca telefonică. Se face apoi un nou reglaj al raportului $\frac{R_2}{R_1}$ sau al capacității condensatorului etalon, urmat de încă un reglaj al rezistenței R_0 , astfel încît după cîteva reglări succesive se obține echilibrarea completă a punții.

c) **Puntea Nernst.** Capacitatea condensatoarelor cu pierderi mari în dielectric se determină cu ajutorul punții Nernst. Această punte este similară cu puntea Sauty, deosebindu-se de aceasta prin aceea că în paralel cu condensatorul etalon este conectată o rezistență de precizie variabilă R_0 (fig. 5-15). Aceasta se face, deoarece introducerea în serie a unei rezistențe mai mari în braț micșorează curentul prin aparatul indicator de zero, reducînd astfel sensibilitatea punții.

Relația de echilibru pentru puntea Nernst este următoarea:

$$R_1 \frac{1}{\frac{1}{R_0} + j\omega C_0} = R_2 \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x}, \quad (5-32)$$

unde s-a notat cu R_x rezistența echivalentă pierderilor în condensatorul de măsurat, considerată în paralel cu aceasta.

Egalînd părțile reale și imaginare ale acestei relații, se obține:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} \quad \text{și} \quad C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (5-33)$$

Tangenta unghiului de pierderi este:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{R_x C_x \omega} = \frac{1}{R_0 C_0 \omega}. \quad (5-34)$$

Echilibrarea punții Nernst se face în același mod ca și echilibrarea punții Wien.

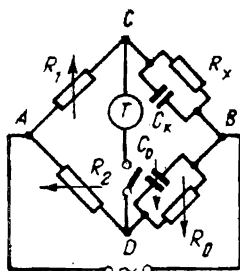


Fig. 5-15. Schema punții Nernst.

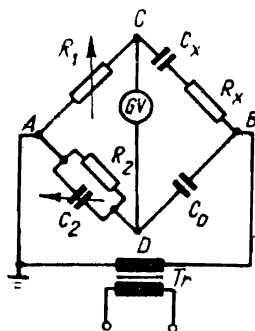


Fig. 5-16. Schema punții Schering.

d) **Puntea Schering.** Pentru determinarea capacității și a pierderilor în dielectric a cablurilor de înaltă tensiune, a transformatoarelor de curent, a izolatoarelor de trecere și a materialelor izolante, în care caz alimentarea trebuie să se facă de la o sursă de înaltă tensiune, se folosește puntea Schering. Această punte permite determinarea printr-o singură măsurare atât a capacității condensatorului, cât și a rezistenței acestuia, presupusă în serie, și a tangentei unghiului de pierderi ($\operatorname{tg} \delta$). Schema de principiu a punții Schering este arătată în figura 5-16, în care C_x este condensatorul de măsurat, R_x — rezistența echivalentă pierderilor în acest condensator, presupusă în serie, C_0 — un condensator etalon fix în aer (fără pierderi), R_1 — o rezistență de precizie, variabilă, R_2 — o rezistență fixă, C_2 — un condensator etalon reglabil cu aer, GV — un galvanometru de vibrație, iar Tr — un transformator de înaltă tensiune. Punctul A al punții se leagă la pământ, pentru ca manipularea punții să nu prezinte pericol. Condiția generală de echilibru a punților de curent alternativ în cazul punții Schering se scrie:

$$R_1 \frac{1}{jC_0\omega} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + jC_2\omega} \left(R_x + \frac{1}{jC_x\omega} \right), \quad (5-35)$$

de unde, egalînd părțile reale și imaginare, se obține:

$$R_x = R_1 \frac{C_2}{C_0} \quad \text{și} \quad C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (5-34)$$

Tangenta unghiului de pierderi este:

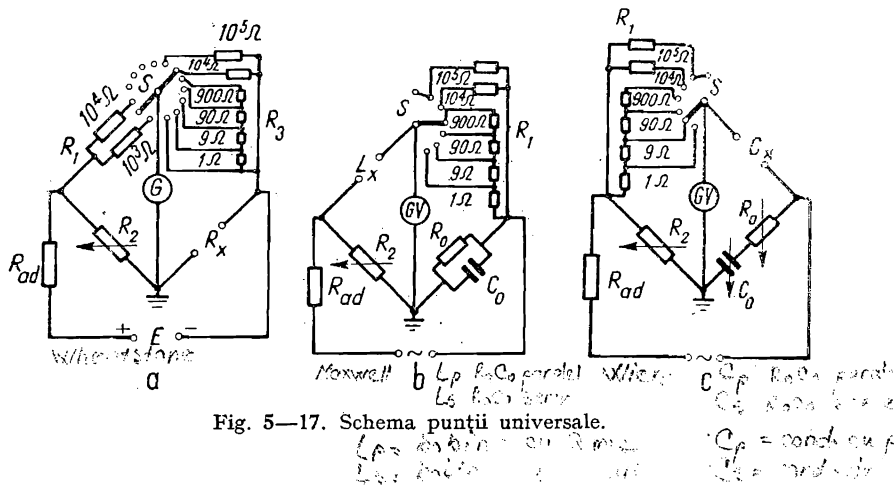
$$\operatorname{tg} \delta_x = R_x C_x \omega = R_1 \frac{C_2}{C_0} \frac{R_2}{R_1} \omega = R_2 C_2 \omega. \quad (5-35)$$

Echilibrul punții se obține, ca la majoritatea punților de curent alternativ, variind succesiv rezistența R_1 și condensatorul C_2 pînă la obținerea deviației minime a galvanometrului.

e) **Puntea universală RLC.** Punțile universale RLC permit măsurarea rezistențelor, inductanțelor și capacităților. Măsurarea rezistenței se face cu un montaj de punte care funcționează în curent continuu (în special puntea Wheatstone), iar măsurarea inductanțelor și capacităților cu montaje de punți care funcționează în curent alternativ (punți Maxwell, Wien, Nernst etc).

Punțile universale RLC sînt alcătuite în general dintr-un generator electronic stabilizat (de obicei de 1 000 Hz) puntea propriu-zisă, un aparat electronic indicator de zero și un redresor pentru alimentarea punții în curent continuu la măsurarea rezistențelor.

Măsurarea rezistențelor se face cu un montaj de punte Wheatstone (figura 5-17, a). Rezistența de comparație R_2 poate fi variată continuu, iar rezistențele de raport R_1 și R_3 se stabilesc cu ajutorul comutatorului S , care schimbă gama de măsurare. Se pot măsura rezistențe între $0,1 \Omega$ și $10^6 \Omega$, cu o precizie de $\pm 1\%$. La măsurarea rezistențelor mai mici de 1Ω , din valoarea obținută trebuie scăzută rezistența conductoarelor de legătură și a contactelor din interiorul punții ca și a celor din exterior. În acest scop



se leagă în scurtcircuit conductoarele de legătură a rezistenței necunoscute la punte și se măsoară valoarea lor la un loc cu rezistența de zero a punții. Dacă rezistența de măsurat este mai mică de $10^{-2} \Omega$ erorile vor fi prea mari și atunci este indicată folosirea unei punți duble.

Măsurarea inductanțelor se face cu un montaj de punte Maxwell (figura 5-17,b). Se pot măsura inductanțe cuprinse între 10^{-6} și 100 H cu o eroare de $\pm 1\%$.

Măsurarea capacităților se execută cu un montaj de punte Wien (figura 5-17,c), unde ca element de comparație se folosește condensatorul C montat în brațul alăturat condensatorului de capacitate necunoscută. Domeniul de măsurare este cuprins între 10^{-5} și $100\mu\text{F}$, cu o eroare de măsurare de $\pm 1\%$. O dată cu măsurarea capacităților se poate determina și tangenta unghiului de pierderi.

Alimentarea punții universale se face de la rețeaua industrială de curent alternativ.

4. MĂSURAREA CAPACITĂȚII CU FARADMETRUL

Măsurarea directă a capacității se poate face cu aparate speciale, numite *faradmetre* sau *microfaradmetre*. Acestea sînt de obicei aparate diferențiale de tip logometric.

În figura 5-18 este reprezentată schema unui microfaradmetru ferodinamic. Aparatul este alcătuit din două bobine fixe B_1 și B_2 ale căror miezuri mobile de oțel sînt fixate pe același ax cu acul indicator. În serie cu bobina B_1 este conectat condensatorul de măsurat C_x , iar în serie cu bobina B_2 , un condensator etalon C_0 (montat chiar în interiorul aparatului).

Bobinele aparatului legate în serie cu condensatoarele sînt conectate în paralel la rețeaua de curent alternativ.

Dacă se neglijează inductanța și rezistența bobinelor aparatului în comparație cu capacitatea condensatoarelor legate în serie, prin bobina B_1 a aparatului trece curentul $I_1 = UC_x\omega$, iar prin bobina B_2 , curentul $I_2 = UC_0\omega$. Ca la orice dispozitiv de măsurat logometric, deviația sistemului mobil este determinată de raportul curenților în bobine. Se poate scrie deci:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{UC_x\omega}{UC_0\omega}\right) = f_1\left(\frac{C_x}{C_0}\right) = f_2(C_x). \quad (5-36)$$

În consecință, unghiul de deviație a sistemului mobil depinde numai de mărimea capacității condensatorului de măsurat C_x (condensatorul etalon C_0 avînd o valoare constantă).

În general, aparatul se construiește cu două sensibilități ($1 - 2\mu\text{F}$ și $5 - 10\mu\text{F}$), obținute prin împărțirea uneia dintre bobine în două părți, care pot fi conectate fie în serie, fie în paralel.

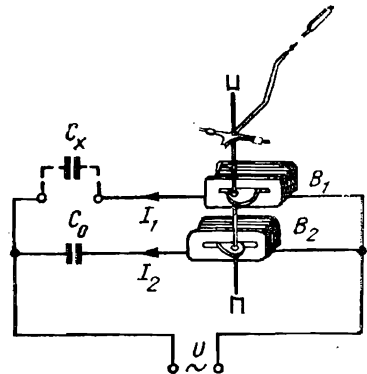


Fig. 5-18. Schema microfaradmetrului feromagnetic.

Capitolul VI

MĂSURAREA PUTERILOR

A. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE

1. MĂSURAREA PUTERII ÎN CIRCUITELE DE CURENT CONTINUU CU AMPERMETRUL ȘI VOLTMETRUL

În curent continuu puterea consumată într-un circuit fiind egală cu produsul dintre intensitatea curentului care circulă prin circuit și tensiunea aplicată la borne, valoarea sa se poate afla înmulțind indicația I a unui ampermetru montat în serie în circuit, cu indicația U a unui voltmetru montat în derivație, adică $P_m = UI$. Schema se poate realiza fie în montaj aval (fig. 6-1,*a*), fie în montaj amonte (fig. 6-1,*b*).

Din cauza consumului propriu al celor două aparate de măsurat, ambele montaje dau o eroare sistematică de metodă. De aceea, pentru determinarea puterii efectivă P consumată în receptor trebuie să se corecteze puterea măsurată P_m dată de produsul indicațiilor ampermetrului și voltmetrului,

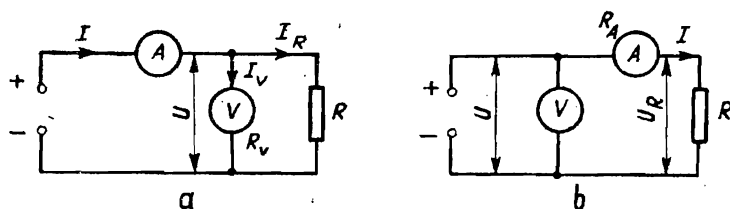


Fig. 6—1. Măsurarea puterii cu ampermetrul și voltmetrul.

scăzîndu-se din ea puterea consumată de voltmetru ($p_v = UI_v = \frac{U^2}{R_v}$) în montajul aval:

$$P = UI_R = P_m - p_v = UI - \frac{U^2}{R_v} \quad (6-1)$$

sau de ampermetru ($p_A = R_A I^2$) în montajul amonte:

$$P = U_R I = P_m - p_A = UI - R_A I^2, \quad (6-2)$$

unde R_A și R_V sînt rezistențele ampermetrului și voltmetrului, I_V curentul prin voltmetru, iar I_R și U_R curentul și respectiv căderea de tensiune în receptor.

Dacă nu se cunosc caracteristicile aparatelor de măsurat și valoarea puterii absorbite se determină din produsul indicațiilor ampermetrului și voltmetrului, rezultatul măsurării este afectat de o eroare sistematică. Această eroare depinde de raportul dintre rezistența receptorului și valoarea rezistențelor aparatelor de măsurat folosite; ea este cu atît mai mică în cazul montajului aval cu cît rezistența receptorului R este mai mică în comparație cu rezistența voltmetrului R_V , iar în cazul montajului amonte, cu cît rezistența receptorului R este mai mare în comparație cu rezistența ampermetrului R_A . De asemenea, eroarea sistematică de metodă este redusă pentru montajul aval în cazul tensiunilor mici și curenților de intensitate mare, iar pentru montajul amonte, în cazul tensiunilor mari și curenților de intensitate mică.

Eroarea sistematică de metodă este importantă numai în cazul măsurării puterilor mici, de același ordin de mărime cu puterile consumate de aparatele de măsurat. În celelalte cazuri, care sînt cele mai întîlnite în măsurările de puteri, această eroare este atît de mică încît se neglijează.

2. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE CU WATTMETRUL ÎN CIRCUITELE DE CURENT CONTINUU ȘI MONOFAZATE DE CURENT ALTERNATIV

Măsurarea directă a puterii active se efectuează cu wattmetre de tip electrodinamic (în curent continuu și curent alternativ) sau de tip de inducție (numai în curent alternativ).

a) **Măsurarea puterii active cu wattmetrul electrodinamic.** Wattmetrele electrodinamice sînt dispozitive de măsurat electrodinamice cu cîmp radial ale căror deviații sînt proporționale în curent continuu cu produsul curenților prin bobina fixă și cea mobilă, iar în curent alternativ și cu cosinusul unghiului de defazaj dintre curenți (v. relațiile 2-29 și 2-30). Spre deosebire de ampermetrele și voltmetrele electrodinamice, bobinele dispozitivului de măsurat nu se leagă între ele, ci formează circuite independente (fig. 6-2); bobina fixă se conectează în serie cu circuitul de măsurat, prin ea trecînd curentul de sarcină I și formînd *circuitul de curent*, iar bobina mobilă în serie cu o rezistență adițională R_{ad} se conectează în paralel la circuitul de măsurat, aplicîndu-i-se astfel tensiunea rețelei U și formînd *circuitul de tensiune*. În felul acesta prin cele două bobine trec curenți diferiți:

$$I_1 = I \text{ și } I_2 = \frac{U}{Z_2} \cong \frac{U}{R_2},$$

unde $Z_2 \cong R_2$ este impedanța totală a circuitului de tensiune, care este aproximativ egală cu rezistența sa R_2 , deoarece inductanța sa este practic neglijabilă.

Ca urmare deviația wattmetrului electrodinamic este pentru circuitele de curent continuu:

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 = \frac{1}{D} I \frac{U}{R_2} = C P, \quad (6-3)$$

iar pentru circuitele de curent alternativ:

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \cos(\widehat{I_1 I_2}) = \frac{1}{D} I \frac{U}{R_2} \cos(\widehat{I, U}) = \frac{1}{D R_2} I U \cos \varphi = C P, \quad (6-4)$$

adică este proporțională cu puterea activă dată de tensiunea aplicată circuitului de tensiune și de curentul care trece prin bobina de curent a dispozitivului de măsurat. Scara wattmetrului electrodinamic este uniformă.

Bobina fixă (de curent) a wattmetrului este alcătuită dintr-un număr mic de spire de secțiune mare, iar bobina mobilă (de tensiune) dintr-un număr mare de spire de sîrmă subțire.

La conectarea wattmetrului în circuit trebuie respectat sensul curenților în bobine. Inversarea sensului curentului în una din bobine provoacă schimbarea sensului forțelor de acțiune reciprocă și a sensului de deviație a bobinei mobile. De aceea bornele bobinelor care se conectează la sursa de alimentare (bornele de intrare) se notează pe aparate cît și pe schemă printr-o steluță.

Rezistența adițională se conectează în circuitul de tensiune totdeauna după bobina mobilă, în partea dinspre sarcină. Dacă rezistența se conectează înaintea bobinei mobile, atunci între bobina fixă și mobilă va fi o diferență de potențial egală cu tensiunea rețelei, ceea ce poate provoca erori din cauza acțiunii electrostatice dintre bobine și deteriorarea izolației acestora.

Wattmetrele electrodinamice se construiesc de obicei pentru două valori nominale ale curentului din circuitele de curent și mai multe tensiuni nominale ale circuitului de tensiune. Pentru aceasta, bobina fixă a wattmetrului

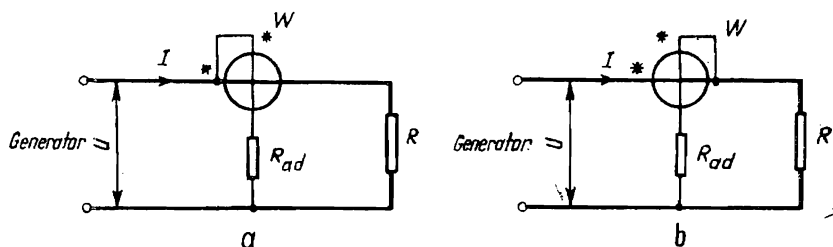


Fig. 6-2. Schemele de conectare a wattmetrului electrodinamic.

are înfășurarea compusă din două jumătăți identice; pentru valoarea mai mică a curentului nominal, cele două jumătăți se leagă în serie (fig. 6-3, linia continuă), iar pentru valoarea mai mare a curentului (de două ori mai mare)

se leagă în paralel (fig. 6-3, linia punctată). De asemenea, rezistența adițională este împărțită în câteva secțiuni, la fel ca rezistențele adiționale ale voltmetrelor. În afară de aceasta, circuitul de tensiune mai are o bornă marcată cu „1 000Ω” corespunzătoare tensiunii de 30 V, la care se conectează rezistențele adiționale exterioare.

De obicei wattmetrele sînt astfel construite încît deviația maximă a acului indicator corespunde la curentul și tensiunea nominală și $\cos \varphi = 1$. Cu aceste valori se determină constanta wattmetrului, adică numărul de wați care corespunde la o diviziune a scării gradate. Astfel, dacă wattmetrul are 150 diviziuni și este construit pentru o tensiune nominală de 150 V și un curent nominal de 5 A, la $\cos \varphi = 1$, constanta sa va fi:

$$C = \frac{5 \cdot 150 \cdot 1}{150} = 5 \text{ W/div.}$$

Pentru măsurarea puterilor sub factor de putere redus (de exemplu măsurarea pierderilor în miezul transformatoarelor, în condensatoare etc...), cînd apar erori suplimentare datorită inductanței bobinei de tensiune, se folosesc wattmetre cu $\cos \varphi$ redus, care dau indicație maximă la curentul și tensiunea nominală și $\cos \varphi = 0,25$ sau 0,1.

După modul de legare a bobinei de tensiune față de cea de curent, schemele de conectare ale wattmetrului pot fi în montaj amonte (v. fig. 6-2,a) sau în montaj aval (v. fig. 6-2,b). Ca urmare, la fel ca la măsurarea puterii cu ampermetrul și voltmetrul, indicațiile wattmetrului sînt afectate de o eroare sistematică datorită consumului de putere în bobina de curent sau în cea de tensiune. La măsurarea puterilor mici erorile datorate acestor consumuri nu pot fi neglijate, și ca urmare trebuie efectuate corecțiile; în acest caz, wattmetrul se conectează în circuit în montaj aval, deoarece, de obicei, cunoscîndu-se rezistența bobinei de tensiune, corecția se calculează mai ușor.

La măsurările la care nu se face corecția erorii de metodă, wattmetrele se conectează în circuit, de obicei în montaj amonte, deoarece puterea consumată în bobina de curent este mai mică decît cea consumată în bobina de tensiune.

În curent continuu indicațiile wattmetrelor electrodinamice fiind influențate de cîmpul magnetic terestru este necesar a se efectua două măsurări, cu sensul invers al curenților în bobinele dispozitivului de măsurat și luînd media celor două citiri. Din această cauză, în curent continuu măsurarea

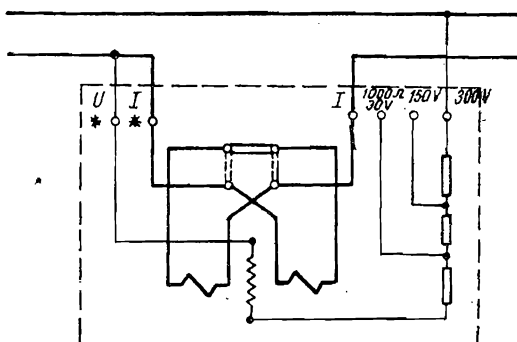


Fig. 6—3. Schema de conexiuni a wattmetrului electrodinamic cu mai multe domenii de măsurare.

puterii cu wattmetrul electrodinamic este mai puțin folosită decât metoda ampermetrului și voltmetrului.

Cînd tensiunile și curenții în circuitele de măsurare depășesc valorile nominale ale wattmetrului, acesta se conectează în circuit prin intermediul transformatoarelor de măsurat. După cum se utilizează un singur transformator de măsurat (de curent sau de tensiune) sau ambele transformatoare, se disting montaje semiindirecte (fig. 6-4 *a* și *b*) și respectiv indirecte (fig. 6-4, *c*). În acest caz, puterea măsurată P_m se obține înmulțind indicația wattmetrului P_w cu rapoartele de transformare nominale K_{in} și K_{un} ; de

exemplu pentru montajul indirect:

$$P_m = K_{in} K_{un} P_w. \quad (6-5)$$

Prin folosirea rapoartelor de transformare nominale, puterea măsurată P_m diferă puțin de puterea efectivă P , datorită erorilor transformatoarelor de măsurat. Pentru montajul indirect eroarea este:

$$\Delta_p = \frac{P_m - P}{P} 100 = \Delta_i + \Delta_u +$$

$$+ 0,0291 (\delta_i - \delta_u) \operatorname{tg} \varphi [\%], \quad (6-6)$$

unde Δ_i și Δ_u sînt erorile de raport ale transformatoarelor (în procente), iar δ_i și δ_u erorile de unghi (în minute).

b. Măsurarea puterii active cu wattmetrul de inducție. Ca wattmetre de inducție se folosesc în special dispozitivele de măsurat de inducție cu cîmp de fugă și trei fluxuri, arătate în figura 2-16.

Pentru ca unghiul de rotație al sistemului mobil al acestor dispozitive să fie proporțional cu puterea consumată în circuit, așa cum rezultă din expresia generală (2-41) a cuplului activ:

$$M_a = K \Phi_I \Phi_U \sin (\hat{\Phi}_I \Phi_U)$$

este necesar ca unul din fluxuri Φ_I să fie proporțional cu intensitatea curentului I care străbate circuitul ($\Phi_I = c'I$), cel de-al doilea flux Φ_U cu tensiunea U a circuitului ($\Phi_U = c''U$), iar sinusul unghiului dintre fluxuri să fie egal cu factorul de

putere al circuitului [$\sin (\hat{\Phi}_I \Phi_U) = \cos \varphi$], adică unghiul dintre fluxuri să fie egal cu $90^\circ - \varphi$.

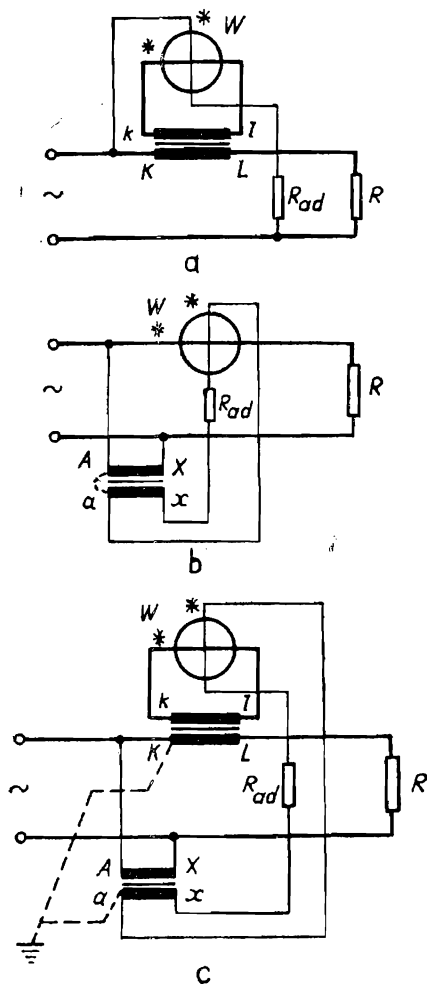


Fig. 6-4. Schemele de măsurare a puterii cu wattmetrul prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

Primele două condiții se îndeplinesc dacă în timpul funcționării miezurile electromagneților sînt nesaturate și dacă înfășurarea unuia dintre electromagneți se leagă în serie cu receptorul de energie, prin ea trecînd curentul de sarcină I , iar înfășurarea celui de-al doilea în paralel cu acesta, aplicîndu-i-se astfel tensiunea U de la bornele acestuia.

Posibilitatea îndeplinirii celei de-a treia condiții se deduce din diagrama fazorială a dispozitivului de măsurat de inducție cu cîmp de fugă (fig. 6-5). Față de tensiunea U aplicată înfășurării în paralel, curentul I prin înfășurarea serie este defazat în urmă cu un unghi oarecare φ (presupunîndu-se că sarcina are un caracter inductiv), iar curentul I_U prin înfășurarea în paralel este defazat în urmă cu un unghi apropiat de 90° (datorită inductanței mari a înfășurării sale). Fluxul produs de curentul I_U are o parte activă Φ_U care străbate discul și una inactivă Φ'_U care nu străbate discul. Fluxurile Φ_I , Φ_U și Φ'_U sînt defazate în urma curenților I , respectiv I_U care îi produc cu unghiurile α_I , α_U și respectiv α'_U ($\alpha_U > \alpha'_U$) datorită pierderilor prin histeresis și curenți turbionari în miezurile electromagneților și în disc. Din diagrama fazorială rezultă că între fluxurile Φ_I și Φ_U există un defazaj $(\Phi_I \Phi_U) = \beta - \varphi - \alpha_I$, unde β este unghiul dintre tensiunea U și fluxul Φ_U . Pentru ca defazajul dintre fluxurile Φ_I și Φ_U să fie egal cu $90^\circ - \varphi$ este necesar să se realizeze:

$$\beta = \varphi + \alpha_I + (90^\circ - \varphi) = 90^\circ + \alpha_I.$$

Aceasta se obține fie variînd unghiului β prin modificarea poziției unor plăci de cupru care se introduc în întrefierul din circuitul fluxului inactiv Φ'_U (care atrage după sine modificarea defazajelor α'_U și α_U), fie variînd unghiul α_I prin reglarea curentului în cîteva spire în scurtcircuit care se prevăd pe miezul electromagnetului în serie.

Cînd cele trei condiții sînt îndeplinite cuplul activ al aparatului este:

$$M_a = Kc'Ic''U \sin(90^\circ - \varphi) = K'IU \cos \varphi = K'P, \quad (6-7)$$

adică wattmetrul măsoară direct puterea activă.

Scara gradată a wattmetrelor de inducție este uniformă și poate ajunge pînă la $270-300^\circ$, ceea ce constituie una din proprietățile principale ale acestor aparate. Datorită însă numeroaselor cauze de erori (neproporționalitatea fluxurilor cu curenții ce îi produc, variația cu frecvența și temperatura etc.), precizia wattmetrelor de inducție este redusă (clasa 1,5 — 2,5) și utilizarea limitată la aparate de tablou și înregistratoare.

Wattmetrul de inducție se folosește numai la măsurarea puterii în curent alternativ. Conectarea sa în circuit este similară cu cea a wattmetrului electrodinamic.

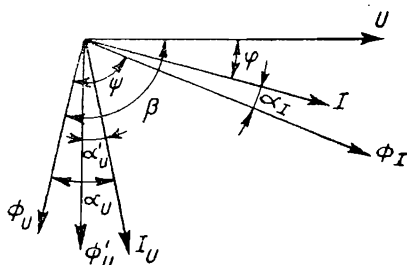


Fig. 6—5. Diagrama fazorială a wattmetrului de inducție cu cîmp de fugă.

3. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITE TRIFAZATE FĂRĂ CONDUCTOR NEUTRU

În cazul general al circuitelor trifazate, fără conductor neutru, cu tensiuni nesimetrice și curenți dezechilibrați, independent de caracterul sarcinii și al schemei de conexiuni, puterea activă este egală cu suma puterilor pe fiecare fază:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_{10} I_1 \cos \varphi_1 + U_{20} I_2 \cos \varphi_2 + U_{30} I_3 \cos \varphi_3, \quad (6-8)$$

în care U_{10} , U_{20} , U_{30} și I_1 , I_2 , I_3 sînt tensiunile și respectiv curenții pe fază, iar φ_1 , φ_2 și φ_3 defazațele dintre tensiuni și curenți. Ca urmare puterea activă totală într-un circuit trifazat fără conductor neutru se poate măsura cu trei wattmetre montate fiecare cu bobina de curent pe cîte o fază și cu bobina de tensiune între faza respectivă și punctul neutru al sarcinii (fig. 6-6,a). Dacă punctul neutru al sarcinii nu este accesibil, bobinele de tensiune se pot conecta la un punct neutru comun N (fig. 6-6,b) al cărui potențial poate fi oarecare. Se demonstrează că în acest caz, indicațiile P_1 , P_2 și P_3 ale wattmetrelor diferă de puterea consumată pe fiecare fază, însă suma lor algebrică rămîne constantă și egală cu puterea activă trifazată.

Dacă punctul neutru comun N se plasează pe una din cele trei faze, devenită în acest caz *fază de referință*, wattmetrul de pe faza respectivă va avea indicația nulă, deoarece bobinei sale de tensiune nu-i este aplicată nici o tensiune, însă suma algebrică a indicațiilor celorlalte două wattmetre rămîne aceeași și egală cu puterea trifazată. Rezultă deci că în acest fel se poate

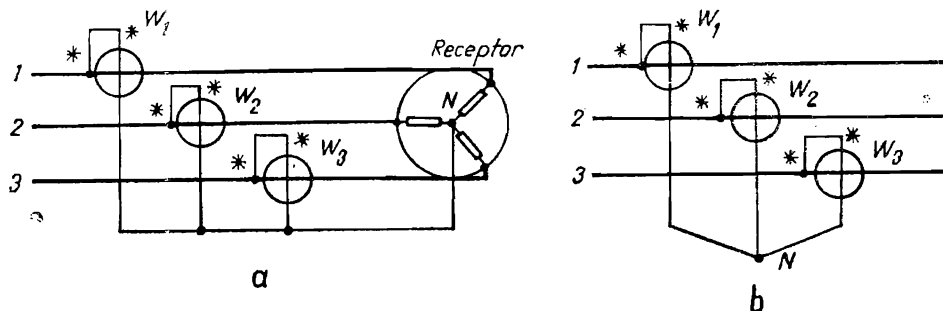


Fig. 6—6. Măsurarea puterii active în trei wattmetre în circuite trifazate fără conductor neutru, nesimetrice și dezechilibrate.

renunța la un wattmetru și astfel *puterea activă a unui circuit trifazat fără conductor neutru, nesimetric și dezechilibrat, se poate măsura numai cu două wattmetre, avînd fiecare bobina de curent montată pe cîte o fază, iar bobina de tensiune legată între faza respectivă și faza de referință liberă.*

După faza de referință aleasă există trei modalități de montare a celor două wattmetre (fig. 6-7) cărora le corespund următoarele expresii ale puterii active trifazate:

— faza 3 de referință (fig. 6-7, a):

$$P = U_{13}I_1 \cos(\widehat{U_{13}I_1}) + U_{23}I_2 \cos(\widehat{U_{23}I_2}) = P_1 + P_2; \quad (6-9)$$

— faza 2 de referință (fig. 6-7, b):

$$P = U_{12}I_1 \cos(\widehat{U_{12}I_1}) + U_{32}I_3 \cos(\widehat{U_{32}I_3}) = P_1 + P_3; \quad (6-10)$$

— faza 1 de referință (fig. 6-7, c):

$$P = U_{21}I_2 \cos(\widehat{U_{21}I_2}) + U_{31}I_3 \cos(\widehat{U_{31}I_3}) = P_2 + P_3. \quad (6-11)$$

În funcție de caracterul sarcinii, unul din wattmetre poate să dea indicații negative dacă unghiul dintre tensiunea aplicată și curent este mai mare de 90° . În aceste cazuri, dacă wattmetrul nu este prevăzut cu un comutator special pentru inversarea sensului curentului în bobina de tensiune, se inversează legăturile la bornele acestei bobine și indicația se ia cu semnul minus, puterea circuitului trifazat fiind astfel egală cu diferența indicațiilor celor două wattmetre:

$$P_1 = P_1 + (-P_2) = P_1 - P_2.$$

În cazul particular al circuitelor trifazate cu tensiuni simetrice și curenți echilibrați, când tensiunile, curenții și defazajele sînt egale între ele:

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U; \quad I_1 = I_2 = I_3 = I \text{ și } \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

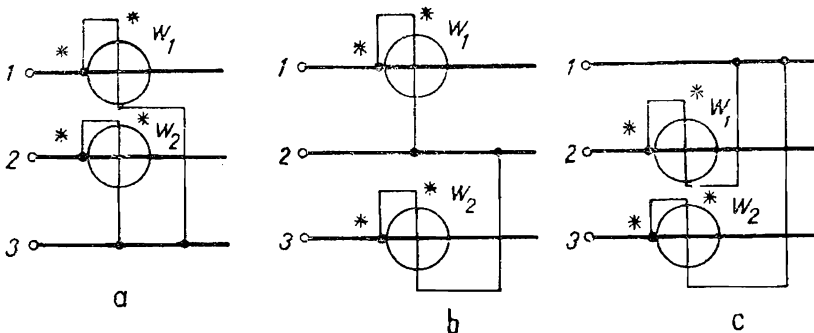


Fig. 6—7. Măsurarea puterii active cu două wattmetre în circuite trifazate fără conductor neutru și dezechilibrate.

așa cum reiese din diagrama fazorială reprezentată în figura 6-8, rezultă că unghiurile

$$\widehat{U_{13}I_1} = 30^\circ - \varphi,$$

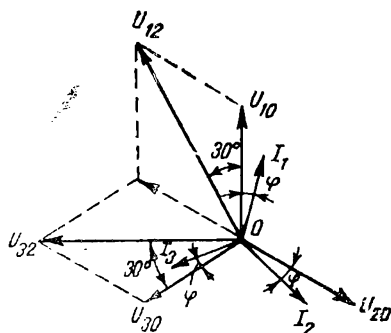


Fig. 6—8. Diagrama fazorială a tensiunilor și curenților unui circuit trifazat simetric și echilibrat.

iar

$$\widehat{U_{23}I_2} = 30^\circ + \varphi.$$

Înlocuind în relația (6-9), rezultă că puterea P măsurată obținută din indicațiile celor două wattmetre este:

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 = UI \cos(30^\circ - \varphi) + \\ &\quad + UI \cos(30^\circ + \varphi) = \\ &= UI 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \end{aligned}$$

adică tocmai puterea totală trifazată.

Măsurarea puterii active cu schema celor două wattmetre se poate realiza și cu un singur wattmetru conectat succesiv, fără a întrerupe circuitul, pe două din fazele circuitului trifazat, cu ajutorul unui comutator wattmetric special.

Pentru o măsurare mai comodă s-au construit *wattmetre trifazate* care constau din două dispozitive de măsurat wattmetric monofazate, montate conform schemei celor două wattmetre. Wattmetrele electrodinamice trifazate au bobinele mobile ale celor două dispozitive de măsurat fixate pe același ax, astfel încât cuplurile lor active se însumează. La wattmetrele de inducție cele două dispozitive de măsurat acționează asupra unui disc comun sau separat asupra a două discuri fixate pe același ax, solidar cu acul indicator,

În cazul circuitelor trifazate cu tensiuni simetrice și curenți echilibrați, tensiunile, curenții și defazajele dintre ele fiind aceleași pe fiecare fază, puterile pe cele trei faze sînt egale și astfel puterea activă se poate măsura cu un singur wattmetru. Acesta se montează cu bobina de curent pe una din faze

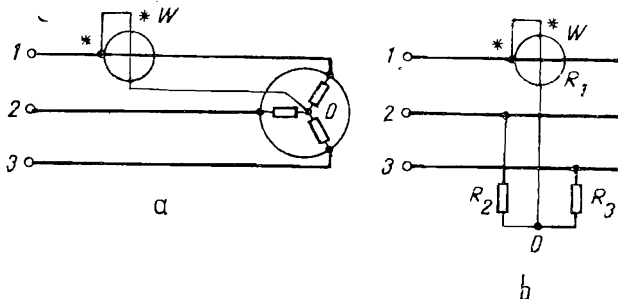


Fig. 6—9. Măsurarea puterii active cu un singur wattmetru în circuite trifazate simetrice și echilibrate.

și cu bobina de tensiune între faza respectivă și punctul neutru al sarcinii. Punctul neutru fiind accesibil numai în cazul sarcinilor simetrice legate în stea (fig. 6-9,a), de obicei este creat în mod artificial cu ajutorul a două re-

zistențe adiționale R_2 și R_3 egale cu rezistența totală a circuitului de tensiune a wattmetrului (fig. 6-9, b). Valoarea puterii active trifazate P se obține înmulțind cu trei indicația P_w a wattmetrului ($P = 3P_w$). Dacă wattmetrul monofazat este destinat să funcționeze permanent în circuite trifazate echi-

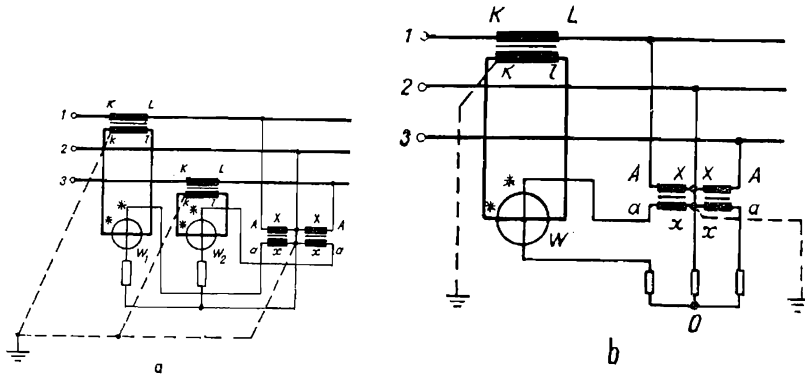


Fig. 6—10. Măsurarea puterii active în circuitele trifazate fără conductor neutru prin intermediul transformatoarelor de măsurat:

a — cu două wattmetre, în circuite nesimetrice și dezechilibrate; b — cu un wattmetru, în circuite simetrice și echilibrate.

librate, scara sa se gradează astfel încât să indice direct puterea activă trifazată.

În circuitele trifazate în care tensiunile și curenții depășesc valorile nominale ale wattmetrelor, măsurarea puterii se efectuează prin intermediul transformatoarelor de măsurat, în montaj semiindirect sau indirect (fig. 6-10). În scopul protecției circuitelor de măsurare față de pericolul pătrunderii accidentale a tensiunii înalte, înfășurările secundare ale transformatoarelor de curent, împreună cu punctul comun al transformatoarelor de tensiune sînt legate la pămînt; în felul acesta diferența de tensiune dintre bobinele dispozitivului de măsurat ale unui wattmetru este de circa 100 V (tensiunea secundară a transformatoarelor de tensiune).

Schema cu două wattmetre este cea mai utilizată schemă de măsurare a puterii active în circuitele trifazate fără conductor neutru, deoarece prezintă avantajul că poate fi folosită în cazul general al circuitelor cu tensiuni nesimetrice și curenți dezechilibrați și necesită numai două aparate de măsurat. Schema cu trei wattmetre se folosește rar, numai la măsurarea puterilor mici, cînd este necesară menținerea simetriei circuitului trifazat (de exemplu în cercarea motoarelor de mică putere).

4. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITELE TRIFAZATE CU CONDUCTOR NEUTRU

În circuitele trifazate cu conductor neutru, puterea activă se măsoară cu trei wattmetre montate cu bobinele de curent pe fiecare fază și cu bobinele de tensiune legate la fazele respective și la conductorul neutru care este con-

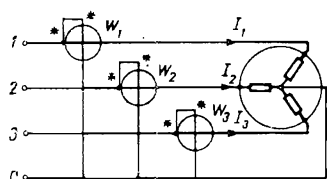


Fig. 6—11. Măsurarea puterii active în circuitele trifazate cu conductor neutru.

ductor de referință (fig. 6-11). Puterea totală trifazată este dată de suma indicațiilor celor trei wattmetre:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_{10} I_1 \cos(\widehat{U_{10} I_1}) + U_{20} I_2 \cos(\widehat{U_{20} I_2}) + U_{30} I_3 \cos(\widehat{U_{30} I_3}). \quad (6-12)$$

În cazul circuitelor trifazate cu conductor neutru, receptorul fiind de obicei montat în stea și conductorul neutru neavînd impedanță, cele trei wattmetre măsoară fiecare puterea consumată pe faza respectivă. Indicațiile wattmetrelor sînt totdeauna pozitive, indiferent de caracterul sarcinii și de asimetria tensiunilor.

Pentru măsurarea directă a puterii trifazate se folosesc wattmetre trifazate cu trei dispozitive de măsurat wattmetrice monofazate, avînd bobinele de tensiune fixate pe același ax, asupra căruia acționează toate trei cuplurile, astfel că indicațiile sînt proporționale cu puterea trifazată.

În figura 6-12 este reprezentată schema de montaj indirect a wattmetrelor pentru măsurarea puterii prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

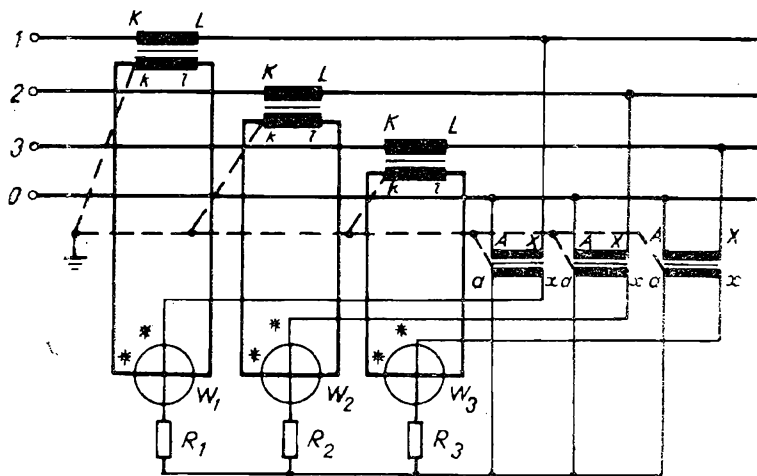


Fig. 6—12. Măsurarea puterii active trifazate cu conductor neutru, prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

B. MĂSURAREA PUTERII REACTIVE

Măsurarea puterii reactive se poate face prin două metode: indirectă și directă, întrebuițîndu-se ca aparate de măsurat wattmetre sau varmetre.

1. MĂSURAREA INDIRECTĂ A PUTERII REACTIVE

Principiul metodei constă în a deduce prin calcul puterea reactivă Q din relația:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Puterea activă P se măsoară cu wattmetrul, iar puterea aparentă $S = UI$ se calculează din indicațiile unui voltmetru și a unui ampermetru.

Metoda indirectă se poate aplica numai în cazul circuitelor monofazate și a celor trifazate simetrice și echilibrate.

În circuitele monofazate se măsoară puterea activă $P = UI \cos \varphi$, tensiunea U și curentul I cu care se calculează puterea aparentă $S = UI$ și apoi se determină puterea reactivă cu relația:

$$Q = \sqrt{(UI)^2 - P^2}. \quad (6-13)$$

În circuitele trifazate simetrice și echilibrate se măsoară puterea trifazată activă $P = P_1 + P_2$ cu schema celor două wattmetre, tensiunea între faze U și curentul I pe fază, cu care se calculează puterea aparentă $S = \sqrt{3} UI$ și apoi se determină puterea reactivă cu relația:

$$Q = \sqrt{(\sqrt{3}UI)^2 - (P_1 + P_2)^2}. \quad (6-14)$$

În general metoda indirectă de măsurare a puterii reactive nu dă rezultate precise din cauza numărului mare de aparate întrebuințate și a consumului acestora, ale căror corecții sînt destul de greu de făcut.

2. MĂSURAREA DIRECTĂ A PUTERII REACTIVE CU AJUTORUL WATTMETRELOR

Puterea reactivă se poate măsura direct cu wattmetrele dacă se alimentează bobina de curent cu curentul pe fază I și bobinei de tensiune i se aplică o tensiune auxiliară U' de aceeași frecvență cu tensiunea U a circuitului de măsurare, dar defazată cu 90° în urma acesteia. În acest caz, între curentul I și tensiunea auxiliară U' existînd un defazaj de $90^\circ - \varphi$, indicația P_w a wattmetrului:

$$P_w = U' I \cos(90^\circ - \varphi) = U' I \sin \varphi = \frac{U'}{U} UI \sin \varphi = \frac{U'}{U} Q \quad (6-15)$$

este proporțională tocmai cu puterea reactivă Q . Valoarea acesteia în funcție de indicația wattmetrului va fi deci:

$$Q = \frac{U'}{U} P_w. \quad (6-16)$$

În practică găsirea unei astfel de tensiuni auxiliare este dificilă. Din această cauză metoda nu se folosește decât în cazul circuitelor trifazate simetrice, unde se pot obține ușor tensiunile auxiliare necesare alimentării bobinelor de tensiune ale wattmetrelor.

În circuitele trifazate simetrice tensiunile între faze sînt defazate cu 90° , în urma tensiunii de pe faza cu care nu este în corespondență. Astfel tensiunea între faze U_{23} este defazată cu 90° în urma tensiunii pe fază U_{10} (fig. 6-13, b), tensiunea U_{31} față de U_{20} și tensiunea U_{12} față de U_{30} . În acest caz deci, folosind tensiunile între faze ca tensiuni auxiliare se poate măsura puterea reactivă trifazată cu ajutorul a trei wattmetre montate cu bobinele de curent pe cîte o fază și bobinele de tensiune legate între celelalte două faze (fig. 6-13, a). Avînd în vedere că raportul între tensiunea pe fază și tensiunea auxiliară este $\frac{U}{U'} = \frac{1}{\sqrt{3}}$, puterea reactivă trifazată este:

$$\begin{aligned} Q &= U_{10}I_1 \sin(\widehat{U_{10}I_1}) + U_{20}I_2 \sin(\widehat{U_{20}I_2}) + U_{30}I_3 \sin(\widehat{U_{30}I_3}) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} [U_{23}I_1 \cos(\widehat{U_{23}I_1}) + U_{31}I_2 \cos(\widehat{U_{31}I_2}) + U_{12}I_3 \cos(\widehat{U_{12}I_3})] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}), \end{aligned} \quad (6-17)$$

unde P_{w1} , P_{w2} și P_{w3} sînt indicațiile celor trei wattmetre.

În circuitele trifazate simetrice și dezechilibrate puterea reactivă se poate măsura și numai cu două wattmetre, la fel ca puterea activă. Luînd faza a

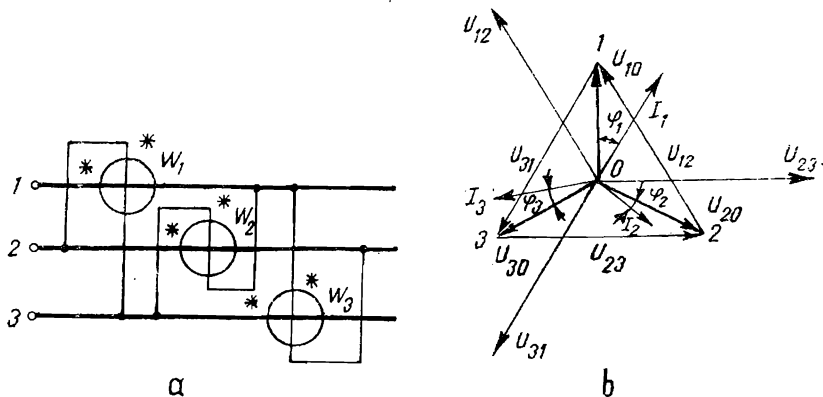


Fig. 6—13. Măsurarea puterii reactive cu trei wattmetre în circuite trifazate simetrice și dezechilibrate.

treia ca faza de referință, expresia puterii reactive trifazate este analogă cu cea a puterii active:

$$Q = U_{13}I_1 \sin(\widehat{U_{13}I_1}) + U_{23}I_2 \sin(\widehat{U_{23}I_2}). \quad (6-18)$$

Tensiunile auxiliare defazate cu 90° în urma tensiunilor U_{12} și U_{23} sînt U_{20} și respectiv $-U_{10}$ (fig. 6-14, b); raportul dintre aceste tensiuni este $\frac{U_{20}}{U_{10}} = \sqrt{3}$. Aplicînd bobinelor de tensiune ale celor două wattmetre tensiunile U_{20} și

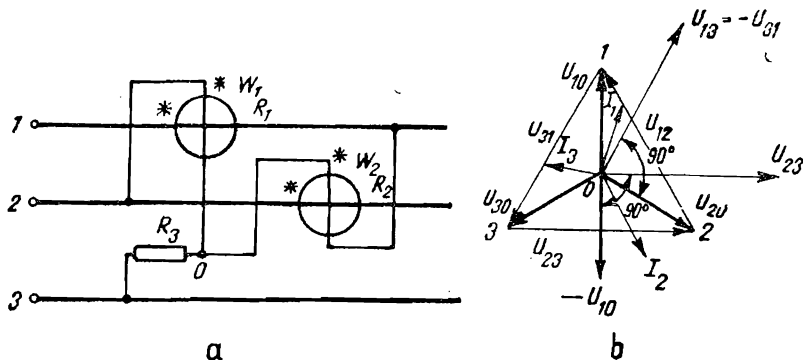


Fig. 6—14. Măsurarea puterii reactive cu două wattmetre în circuite trifazate simetrice și dezechilibrate.

$-U_{10}$ (fig. 6-14, a), puterea reactivă trifazată obținută din indicațiile P_{w1} și P_{w2} ale wattmetrelor este:

$$Q = \sqrt{3} [U_{20} I_1 \cos(\widehat{U_{20} I_1}) + U_{10} I_2 \cos(\widehat{-U_{10} I_2})] = \sqrt{3} (P_{w1} + P_{w2}). \quad (6-19)$$

Pentru a putea aplica bobinelor de tensiune ale wattmetrelor tensiunile pe fază U_{20} și $-U_{10}$, se creează un punct neutru artificial O cu ajutorul unei rezistențe R_3 de valoare egală cu rezistența bobinelor de tensiune ale celor două wattmetre.

Dacă circuitul trifazat cu tensiuni simetrice are și curenții echilibrați, la fel ca și la măsurarea puterii active, puterea reactivă se poate măsura numai cu un singur wattmetru (fig. 6-15). Indicația wattmetrului fiind P_w , puterea reactivă trifazată este:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} 3P_w = \sqrt{3} P_w.$$

3. MĂSURAREA DIRECTĂ A PUTERII REACTIVE CU AJUTORUL VARMETRELOR ELECTRODINAMICE

Varmetrele electrodinamice sînt aparate speciale care permit măsurarea directă a puterii reactive. Ele nu se deosebesc de wattmetrele obișnuite de

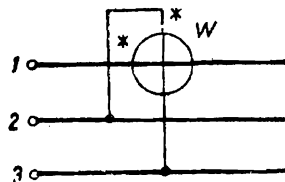


Fig. 6—15. Măsurarea puterii reactive cu un wattmetru în circuite trifazate simetrice și echilibrate.

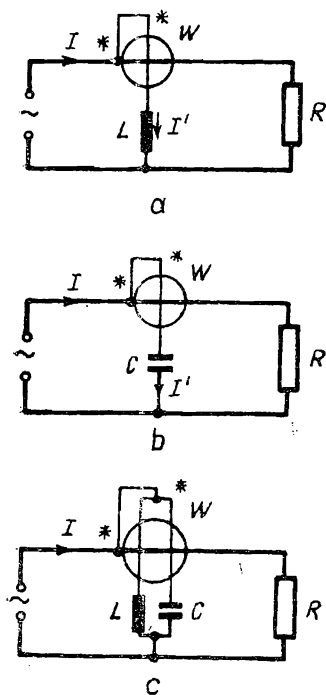


Fig. 6—16. Schemele varmetrelor electrodinamice.

varmetre compensate, cu două bobine de tensiune cuplate pe același ax, una din ele în serie cu o inductanță, iar cealaltă în serie cu un condensator (fig. 6-16, c). Ecuația scării în acest caz are expresia:

$$\alpha = K \left[\frac{1}{L\omega} + C\omega \right] Q. \quad (6-22)$$

Pentru o anumită valoare a lui L și C , pentru care este îndeplinită condiția $LC\omega_0^2 = 1$, în care ω_0 este frecvența pentru care este construit aparatul, indicațiile varmetrelor sînt foarte puțin influențate de variația frecvenței.

Varmetrul se montează în circuitul de măsurare respectînd aceleași reguli privind polaritatea bornelor bobinelor de curent și de tensiune ca și în cazul wattmetrelor. Varmetrul indică în sensul normal dacă defazajul dintre U și I este inductiv și în sens contrar dacă defazajul este capacitiv.

Puterea reactivă se măsoară cu ajutorul varmetrelor prin aceleași metode ca și puterea activă cu ajutorul wattmetrelor, montajele fiind absolut identice.

putere activă decît prin aceea că bobina de tensiune se montează în serie cu o inductanță L foarte mare (fig. 6-16, a), astfel încît curentul I' în bobina de tensiune să fie defazat cu 90° în urma tensiunii de alimentare U (deci față de curentul I prin bobina de curent cu $90^\circ - \varphi$). În aceste condiții, avînd $I' = \frac{U}{L\omega}$

și $\cos(\widehat{I, I'}) = \cos(90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$, ecuația scării wattmetrului electrodinamic devine:

$$\alpha = KII' \cos(\widehat{I, I'}) = \frac{K}{L\omega} IU \sin \varphi = \frac{K}{L\omega} Q, \quad (6-20)$$

adică deviația aparatului este proporțională cu puterea reactivă.

În loc de inductanță se poate monta în serie cu bobina de tensiune un condensator de capacitate C (fig. 6-16, b), în care caz avînd $I' = C\omega U$ se obține:

$$\alpha = KC\omega IU \sin \varphi = KC\omega Q. \quad (6-21)$$

Indicațiile acestor aparate sînt influențate de variațiile frecvenței față de frecvența nominală a aparatului. De aceea se construiesc

Capitolul VII

MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE

Energia electrică este integrala puterii electrice consumată de un receptor într-un interval de timp anumit. În acest fel, expresia energiei active este

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt,$$

iar a energiei reactive, în mod analog

$$W_r = \int_{t_1}^{t_2} Q dt.$$

În consecință, aparatele care măsoară energia electrică trebuie să aibă un dispozitiv wattmetric de măsurare a puterii și un mecanism pentru integrarea energiilor elementare corespunzătoare acestei puteri. Astfel de aparate sînt contoarele.

După mărimea măsurată se deosebesc contoare de energie activă, de energie reactivă și de cantitate de electricitate. După principiul de funcționare se deosebesc contoare electrodinamice, de inducție, magnetoelectrice și electroolitice. Cele mai utilizate sînt contoarele electrodinamice și de inducție.

A. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ACTIVE

1. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITELE DE CURENT CONTINUU

Măsurarea energiei electrice în circuitele de curent continuu se face în general cu contoare de tip electrodinamic.

Contorul electrodinamic (fig. 7-1) este asemănător cu wattmetrul electrodinamic în ceea ce privește principiul de funcționare și construcția sa. Deosebirea constructivă dintre ele constă în faptul că la contor unghiul de ro-

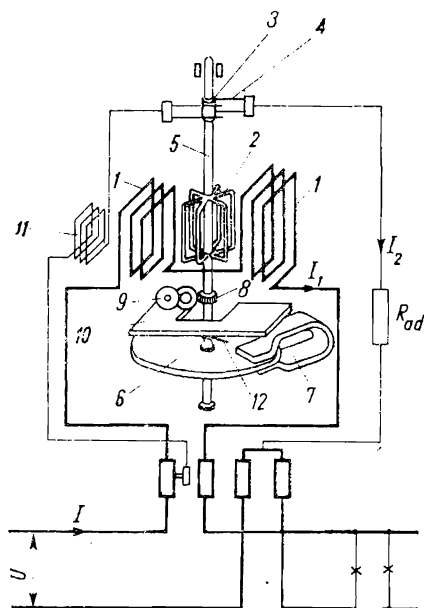


Fig. 7-1. Contorul electrodinamic.

tație al echipajului mobil nu este limitat, acesta putîndu-se roti continuu în același sens, datorită absenței arcurilor spirale. Lipsesc, de asemenea, acul indicator și scara gradată, în locul acestora contorul fiind prevăzut cu un mecanism integrator și o transmisie cu melc.

Contorul electrodinamic constă dintr-o bobină fixă (bobina de curent) formată din două jumătăți identice 1 între care se găsește bobina mobilă 2 (bobina de tensiune) construită ca un rotor de motor, care însă nu conține fier, forma spirelor menținîndu-se prin propria rigiditate a conductoarelor de cupru. De obicei bobina mobilă este alcătuită din trei părți, legate electric între ele în triunghi, deoarece în felul acesta se realizează o rotație mai lentă a sistemului mobil. Aducerea curentului la bobina mobilă se face prin intermediul unui colector 3, pe care calcă două perii de argint 4, cu frecări foarte reduse. Bobina

mobilă este montată pe un ax vertical 5 pe care mai este fixat un disc ușor de aluminiu 6. Discul se rotește între polii unui magnet permanent 7, creînd astfel cuplul de frînare. Axul aparatului angrenează, prin intermediul transmisiei cu melc 8, cu un mecanism integrator 9 al numărului de rotații executat de sistemul mobil.

Între disc și bobinele contorului se găsește un ecran 10 de oțel, care împiedică pătrunderea fluxului magnetului permanent în cîmpul bobinelor ceea ce ar fi fost o sursă suplimentară de erori.

Bobina de curent se leagă în circuit în serie, fiind astfel parcursă de curentul de utilizare I . Bobina de tensiune, montată în serie cu o rezistență adițională R_{ad} și o altă bobină de compensare 11, se leagă în paralel în circuit, fiind astfel alimentată cu tensiunea rețelei U . În felul acesta prin cele două bobine trec curenții:

$$I_1 = I \text{ și } I_2 = \frac{U - E}{R_B + R_c + R_{ad}} \cong \frac{U}{R}, \quad (7-1)$$

în care: R_B este rezistența bobinei mobile;

R_c — rezistența bobinei de compensare;

R_{ad} — rezistența adițională;

$R = R_B + R_c + R_{ad}$ — rezistența totală a circuitului de tensiune;

E — tensiunea contraelectromotoare indusă în înfășurarea bobinei mobile, datorită rotației sale în cîmpul magnetic și care, fiind mult mai mică decît U , se poate neglija.

Curentul I_2 din circuitul bobinei mobile se ramifică în cele trei înfășurări decalate în spațiu cu câte 120° și creează prin interacțiunea cu fluxul Φ_1 dat de curentul I_1 din bobinele fixe câte un cuplu activ care depinde de unghiul de rotație al bobinei mobile aproximativ după o sinusoidă. Cuplul activ rezultat fiind suma celor trei cupluri sinusoidale, decalate cu câte 120° , variază foarte puțin cu unghiul de rotație avînd o valoare aproape constantă:

$$M_a = KI_1I_2 = KI \frac{U}{R} = \frac{K}{R} IU = K_1P, \quad (7-2)$$

care este proporțională cu puterea $P = UI$ consumată de receptor.

Sub acțiunea acestui cuplu sistemul mobil se pune în mișcare. Discul de aluminiu rotindu-se în întrefierul magnetului permanent, se induce în el curenți de inducție I_m (turbionari) care interacționînd cu fluxul Φ_m al magnetului permanent, creează un cuplu de frînare M_f . Avînd în vedere că curenții turbionari sînt proporționali cu fluxul Φ_m al magnetului permanent și cu viteza de rotație n [rot/s] a discului și că fluxul Φ_m al magnetului permanent este constant, rezultă următoarea expresie pentru cuplul de frînare:

$$M_f = k_1\Phi_m I_m = k_1\Phi_m k_2\Phi_m n = k_3\Phi_m^2 n = kn \quad (7-3)$$

Dacă se neglijează frecarea în lagăre, cînd cuplul activ și cuplul de frînare devin egale ($M_a = M_f$), sistemul mobil se rotește cu o viteză de regim uniformă. Această viteză, așa cum rezultă din egalitatea expresiilor (7-2) și (7-3) a celor două cupluri, este proporțională cu puterea consumată de receptor:

$$P = \frac{k}{K_1} n = Cn. \quad (7-4)$$

Integrînd această egalitate pentru un interval de timp t , se obține valoarea energiei consumată de receptor:

$$W = \int_0^t P dt = \int_0^t Cn dt = CN \quad (7-5)$$

care este proporțională cu numărul de rotații N efectuate de disc în timpul t .

Factorul de proporționalitate C este o mărime aproximativ constantă pentru fiecare contor și poartă denumirea de *constantă reală a contorului*. Întrucît viteza de regim a contoarelor este relativ mică (1-2 rot/s) constanta C are o valoare subunitară, din care cauză în practică se utilizează valoarea inversă a acesteia:

$$C_n = \frac{1}{C} = \frac{N}{W} \text{ [rot/kWh]}$$

care se numește *constantă nominală a contorului* și reprezintă numărul de rotații ale sistemului corespunzător unității de energie consumată.

Din relația (7-5) rezultă că măsurarea energiei consumate într-un circuit se reduce la numărarea rotațiilor discului contorului în intervalul de timp corespunzător. Această măsurare este realizată de mecanismul integrator.

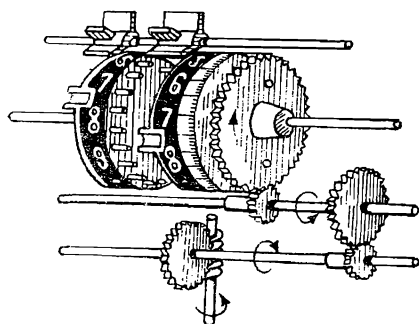


Fig. 7-2. Mecanism integrator cu role.

Acesta constă dintr-o serie de roți dințate și role marcate cu cifre de la 0 la 9 (fig. 7-2). Rolele sînt cuplate între ele astfel încît la rotirea completă a uneia, cea din vecinătate se rotește cu $1/10$ dintr-o rotație. Doar una din role și anume cea care indică unitățile, este cuplată în permanență cu axul discului, celelalte role fiind decuplate unele de altele.

La deducerea relației (7-5) dintre energia consumată și numărul de rotații efectuate de contor, s-au neglijat frecările axului în lagăre, a periilor pe colector și în mecanismul integrator, care in-

fluentează indicațiile contorului în special în cazul sarcinilor mici. Pentru micșorarea acestei influențe (și deci a erorilor), cuplul datorit frecărilor este compensat printr-un cuplu activ suplimentar, produs de o bobină de compensare 11 (v. fig. 7-1) prevăzută în circuitul bobinei de tensiune. Poziția acesteia se poate regla față de bobina mobilă astfel încît cuplul de compensare să fie egal cu cuplul de frecare. Compensarea perfectă nu se poate obține pentru toate sarcinile, deoarece cuplul activ suplimentar este constant indiferent de sarcină, pe cînd cuplul de frecări crește cu viteza discului; adică cu sarcina. Din această cauză, contorul electrodinamic are o eroare, a cărei valoare este apreciabilă în cazul sarcinilor mici.

Cuplul de compensare a frecărilor este proporțional cu pătratul tensiunii. La creșterea tensiunii, acest cuplu poate depăși cuplul de frecări și astfel contorul pornește în gol, înregistrînd energie fără ca receptorul să consume. Pentru evitarea acestui fenomen, pe axul discului este fixată o sîrmă de fier 12. (v. fig. 7-1), care în momentul cînd se apropie de magnetul permanent este atrasă de acesta și discul se oprește.

Contoarele electrodinamice, ca orice dispozitiv electrodinamic, sînt influențate de variațiile temperaturii mediului înconjurător și ale tensiunii și de cîmpurile magnetice exterioare.

Contoarele electrodinamice se pot folosi atît în curent continuu cît și în curent alternativ; în practică însă se utilizează exclusiv în curent continuu.

Contoarele se montează în circuit în același mod ca și wattmetrele, cu bobina de curent în serie și bobina de tensiune în paralel cu receptorul (v. fig. 7-1).

.Datele caracteristice ale unui contor sînt: tensiunea, curentul și frecvența nominală, curentul de suprasarcină, constanta nominală, clasa de precizie, consumurile proprii ale circuitelor sale și sensibilitatea (curentul minim pentru care discul începe să se rotească; de obicei acesta este egal cu 0,3—0,5% din curentul nominal). Contoarele se fabrică, în general, pentru curenți nominali pînă la 100 A și tensiuni nominale pînă la 650 V.

2. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITELE DE CURENT ALTERNATIV

Pentru măsurarea energiei active în circuitele de curent alternativ se folosesc exclusiv contoarele de inducție monofazate sau trifazate, după felul circuitului.

a. Contorul de inducție monofazat. Contorul de inducție are aceeași construcție și funcționare ca și wattmetrul de inducție cu câmp de fugă și trei fluxuri. În figura 7-3 este reprezentată construcția și modul de conectare la rețea a contorului de inducție de tip tangențial. Electromagnetul 7, denumit și electromagnet de curent, este legat în serie cu receptorul de energie, iar electromagnetul, 2 denumit de tensiune, în paralel cu acesta. Dispozitivul de măsurat nu are arcuri spirale pentru producerea cuplului rezistent, în schimb este prevăzut cu un magnet permanent 3, al cărui câmp, interacționând cu curenții turbionari induși în discul 4, creează cuplul de frinare.

Diagrama fazorială a contorului de inducție, cum și expresia cuplului activ coincid cu cele ale wattmetrului de inducție. În consecință cuplul activ al contorului este proporțional cu puterea P consumată de receptor:

$$\begin{aligned} M_a &= K \Phi_I \Phi_U \sin(\Phi_I \Phi_U) = K' IU \sin(90^\circ - \varphi) = \\ &= K' IU \cos \varphi = K' P. \end{aligned} \quad (7-6)$$

Cuplul de frinare M_f creat la fel ca la contorul electrodinamic are expresie analogă cu a cuplului acestuia:

$$M_f = k_1 \Phi_m I_m = k'_1 \Phi_m^2 n = kn. \quad (7-7)$$

Pe lângă cuplul de frinare M_f , în contorul de inducție mai acționează două cupluri de frinare suplimentare datorită interacțiunii dintre fluxurile Φ_I și Φ_U și curenții turbionari produși în disc de fiecare din aceste fluxuri; expresia acestor cupluri este analogă cu cea a cuplului M_f (relația 7-7):

$$M'_f = k_2 \Phi_I^2 n \text{ și } M''_f = k_3 \Phi_U^2 n. \quad (7-8)$$

Cuplul de frinare total este suma celor trei cupluri:

$$\begin{aligned} M_F &= M_f + M'_f + M''_f = \\ &= (k'_1 \Phi_m^2 + k_2 \Phi_I^2 + k_3 \Phi_U^2) n. \end{aligned} \quad (7-9)$$

Cuplul cu frinare suplimentar M''_f datorat fluxului Φ_U este practic constant și de el se ține seama la

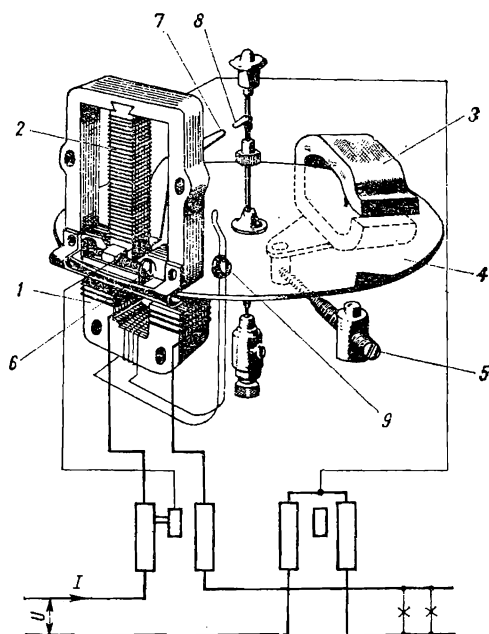


Fig. 7—3. Contorul de inducție monofazat

reglarea poziției magnetului permanent (șurubul 5 din figura 7-3). Cuplul M_f' datorat fluxului Φ_f crește cu pătratul fluxului, devenind deosebit de mare la suprasarcini. Pentru reducerea erorilor cauzate de acest cuplu se montează pe electromagnetul de curent (poziția 1, fig. 7-3) un șunt magnetic, care, la sarcini mici, este nesaturat, neinfluențând variația practic proporțională a fluxului Φ_f cu curentul I ; la sarcini mari șuntul se saturează făcând ca fluxul Φ_f să crească mai mult decât proporțional cu curentul I , surplusul de cuplu activ compensînd cuplul de frînare M_f' . În acest fel cuplurile de frînare suplimentare fiind compensate se pot neglija și astfel cuplul de frînare total va fi:

$$M_F \cong M_f = kn. \quad (7-10)$$

Cînd discul se rotește cu viteza de regim uniformă, la fel ca și la contorul electrodinamic, numărul de rotații efectuat într-un interval de timp t este proporțional cu energia consumată de receptor în acest interval de timp:

$$W = \int_0^t P dt = CN. \quad (7-11)$$

Pentru ca această proporționalitate să fie riguroasă, la fel ca și la contorul electrodinamic, contorul de inducție este prevăzut cu un dispozitiv pentru compensarea frecărilor în lagărele sistemului mobil și în mecanismul integrator, de care nu s-a ținut seama la deducerea expresiei (7-11). Dispozitivul de compensare produce un cuplu suplimentar M_c prin traversarea discului de către două fluxuri decalate în timp și spațiu. Aceste fluxuri se obțin prin crearea unei nesimetrii a fluxului electromagnetului de tensiune cu ajutorul unei spire din material nemagnetic așezată asimetric pe pol (fig. 7-4, *a*) sau a unei plăcuțe tot din material nemagnetic introdusă parțial sub pol (fig. 7-4, *b*), sau a unei piese feromagnetice (șurubul reglabil din oțel 6 din figura 7-3) plasată asimetric lîngă pol (fig. 7-4, *c*). Cuplul de compensare M_c are sensul de la

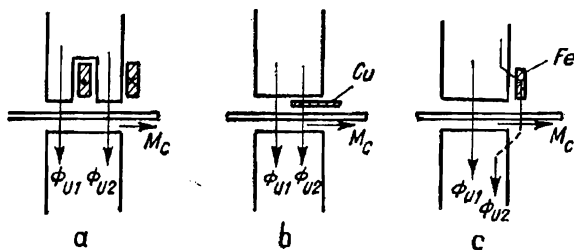


Fig. 7-4. Procedee de creare a cuplului suplimentar de compensare a frecărilor.

fluxul defazat înainte Φ_{U1} la cel defazat în urmă Φ_{U2} (fig. 7-4), valoarea sa variîndu-se prin reglajul nesimetriei fluxurilor. Pentru tensiune și frecvență constantă, cuplul de compensare este constant, indiferent de sarcină. Ca urmare, dat fiindcă cuplul de frecări crește cu sarcina, nu se obține o com-

pensare perfectă pentru toate sarcinile. Pentru sarcini mici cuplul de compensare este mai mare decât cel de frecare, din care cauză, discul se poate roti în gol. Pentru oprirea mersului în gol contorul este prevăzut cu o plăcuță de frînare 7 (v. fig. 7-3) fixată pe miezul electromagnetului de tensiune, care, fiind magnetizată de acesta, atrage și reține pe loc când ajunge în dreptul său o lamea de oțel 8 prinsă pe axul sistemului mobil.

Contorul de inducție, ca orice dispozitiv de măsurat de inducție, este influențat de temperatura mediului înconjurător, de variația frecvenței și tensiunii.

Variația temperaturii produce modificarea rezistenței discului, a fluxului magnetului permanent și a rezistenței bobinei de tensiune. Modificarea rezistenței discului practic nu are efect asupra indicațiilor, deoarece produce variația în aceeași măsură a cuplurilor activ și de frînare. Scăderea fluxului magnetului permanent cu creșterea temperaturii produce oarecare erori pozitive care se pot compensa cu șunturi termomagnetice dispuse pe magnetul permanent. Variația rezistenței bobinei de tensiune modifică unghiul de defazaj β dintre tensiunea U și fluxul Φ_U , ceea ce duce la erori suplimentare.

Variația tensiunii produce variația cuplului de frînare suplimentar datorat fluxului Φ_U , a cuplului de compensare a frecărilor și a defazajului dintre fluxurile Φ_U și Φ_I , care însă au o influență foarte mică asupra indicațiilor.

Variația frecvenței are, de asemenea, o influență neglijabilă.

În afară de acești factori, indicațiile contorului de inducție mai sînt influențate de nerealizarea exactă a defazajului $\beta = 90^\circ + \alpha_I$ între tensiunea U și fluxul Φ_U , de compensarea incompletă a cuplului de frecare, de neproportionalitatea perfectă între fluxuri și curenții care îi produc și de existența cuplurilor suplimentare de frînare, în special a celui datorat fluxului Φ_I care crește cu sarcina. Dacă aceste influențe nu sînt compensate printr-un reglaj corespunzător pot produce erori importante.

Clasele de precizie ale contoarelor sînt 2,5 și 2 pentru utilizarea în tariful energiei electrice și 1 pentru laboratoare și verificări uzinale.

Consumul propriu al contoarelor este 0,5–3 W (2–12 VA), fiind mai mic pentru bobinele de curent decât pentru cele de tensiune. Curentul de pornire este 0,3 – 0,5% din curentul nominal.

Contoarele de inducție monofazate se montează în circuit cu electromagnetul de curent în serie și electromagnetul de tensiune în paralel cu receptorul (fig. 7-5, a). Dacă curentul și tensiunea circuitului depășesc valorile nominale ale curentului și tensiunii contorului, acesta se montează indirect în circuit prin intermediul transformatoarelor de măsurat (fig. 7-5, b).

b) **Contoare trifazate.** Energia electrică activă în circuitele trifazate se măsoară cu contoare monofazate sau trifazate. În primul caz, utilizat mai rar, se folosesc două sau trei contoare monofazate, montate după schema celor două (fig. 7-6), respectiv trei wattmetre la măsurarea puterii active,

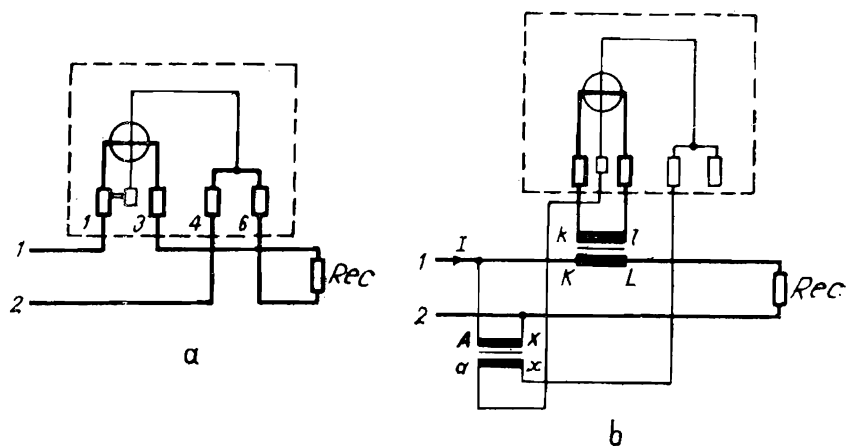


Fig. 7—5. Schemele de conectare în circuit a contorului monofazat de curent alternativ.

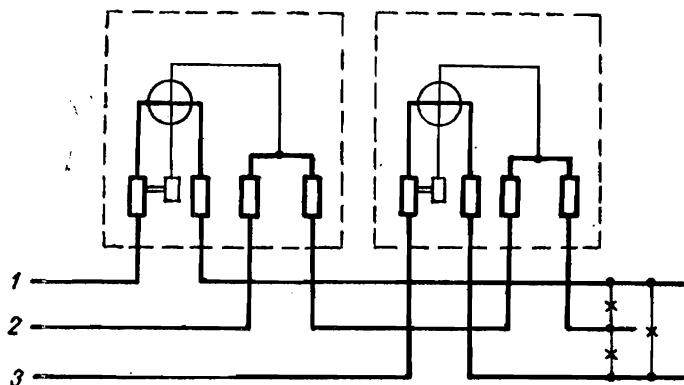


Fig. 7—6. Montajul contoarelor monofazate după schema celor două wattmetre în circuite trifazate fără conductor neutru.

energia totală obținându-se prin însumarea energiilor înregistrate de fiecare contor separat.

Contoarele trifazate reunesc într-un același aparat două sau trei dispozitive de măsurat monofazate (comportând fiecare câte un electromagnet de curent și unul de tensiune) ale căror cupluri active acționează asupra aceluiași ax, astfel încât cuplul activ total este proporțional cu puterea activă trifazată, iar contorul măsoară energia activă totală trifazată.

În circuitele trifazate fără conductor neutru sînt utilizate contoare cu două dispozitive de măsurat care acționează fie separat asupra cite unui disc fixat pe un același ax, fie asupra unui disc comun (mai rar). Cele două sisteme active se montează în circuit după schema celor două wattmetre (fig. 7-7, a).

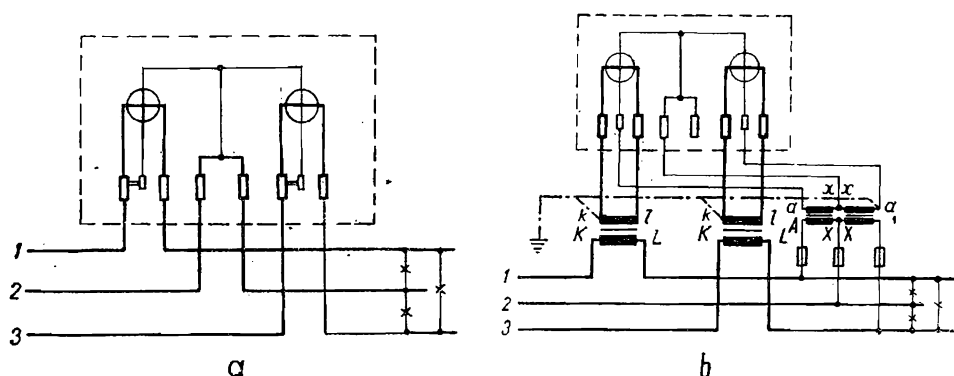


Fig. 7—7. Montajul contoarelor trifazate cu două dispozitive de măsurat.

În circuitele trifazate cu conductor neutru se utilizează contoare cu trei dispozitive de măsurat montate după schema celor trei wattmetre (fig. 7-8, a) și care acționează asupra a trei sau două discuri fixate pe același ax.

În cazul când curentul sau tensiunea de utilizare depășesc valorile nominale pentru care se construiesc contoarele, acestea se montează în circuitele de măsurare prin intermediul transformatoarelor de măsurat (fig. 7-7, b și 7-8, b).

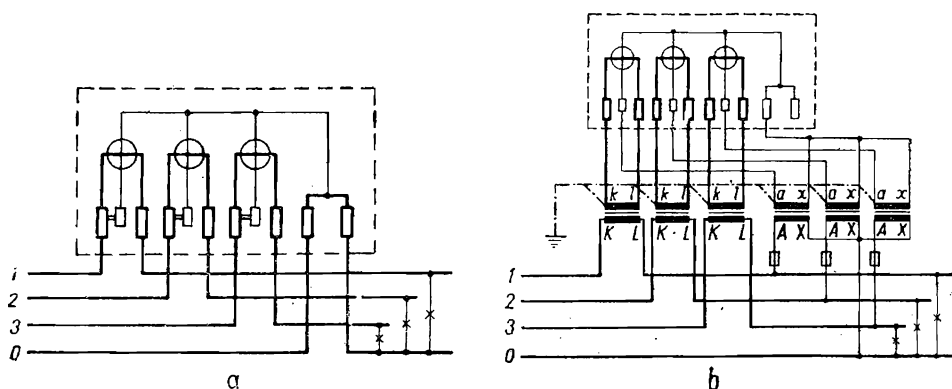


Fig. 7—8. Montajul contoarelor trifazate cu trei dispozitive de măsurat.

La executarea montajelor contoarelor atât direct, cât mai ales prin intermediul transformatoarelor de măsurat, trebuie urmărită realizarea corectă a schemei, excluzându-se posibilitățile de conexiuni greșite, care introduc erori greu de detectat după punerea în funcțiune a instalației.

B. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE REACTIVE

Energia electrică reactivă se poate măsura la fel ca și puterea reactivă în două moduri: fie cu contoare de energie activă alimentate cu tensiuni auxiliare (în circuitele trifazate cu tensiuni simetrice), fie cu contoare speciale cu șunt — *varorămetre* (în circuite trifazate cu tensiuni oarecare).

1. MĂSURAREA ENERGIEI REACTIVE CU CONTOARE DE ENERGIE ACTIVĂ, ALIMENTATE CU TENSIUNI AUXILIARE

Principiul metodei este analog cu cel al măsurării puterii reactive cu ajutorul wattmetrelor.

Pentru ca momentul activ al unui contor de inducție $M_a = K\Phi_I\Phi_U \sin(\widehat{\Phi_I\Phi_U})$ să devină proporțional cu puterea reactivă $Q = IU \sin \varphi$ este necesar ca fluxurile Φ_I și Φ_U să fie proporționale cu curentul I , respectiv cu tensiunea U , iar sinusul unghiului dintre fluxuri să fie egal cu sinusul unghiului φ dintre tensiune și curent (fig. 7-9).

Dacă contorul este conectat în așa fel încât electromagnetul de tensiune să fie alimentat cu o tensiune auxiliară U' defazată în urma tensiunii U cu un unghi $180^\circ - \beta$, unde β este unghiul cu care Φ_U este defazat față de tensiunea U aplicată contorului (se neglijează în acest caz unghiul α_I din figura 6-5), cuplul activ devine:

$$\begin{aligned} M_a &= K\Phi_I\Phi_U \sin(\widehat{\Phi_I\Phi_U}) = Kc'Ic''U' \sin(180 - \varphi) = K'IU' \sin \varphi = \\ &= \frac{U'}{U} K'IU \sin \varphi = \frac{U'}{U} K'Q, \end{aligned} \quad (7-12)$$

adică este proporțional cu puterea reactivă, și contorul înregistrează energia reactivă. La citirea contorului sau la fabricarea lui trebuie să se țină seama de raportul tensiunilor, înmulțindu-se indicația dată de contor cu raportul U/U' .

Obținerea tensiunilor auxiliare este greu de realizat practic în circuitele monofazate sau trifazate cu tensiuni oarecare, însă este foarte comodă în circuitele trifazate cu tensiuni simetrice dacă unghiul β este 60° sau 90° .

Pentru determinarea tensiunilor necesare alimentării circuitelor de tensiune ale contorului se pornește de la expresia puterii reactive pentru circuitul respectiv.

Astfel, în circuitele trifazate fără conductor neutru, cu tensiuni simetrice, încărcate

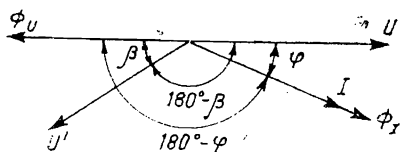


Fig. 7-9. Diagrama fazorială a contorului monofazat alimentat cu tensiune auxiliară.

uniform sau neuniform pe faze, dacă se ia ca fază de referință faza 2, puterea reactivă este dată de relația:

$$Q = U_{12} I_1 \sin(\widehat{U_{12} I_1}) + U_{32} I_3 \sin(\widehat{U_{32} I_3}).$$

Din diagrama fazorială a tensiunilor trifazate simetrice (fig. 7-10) se găsesc următoarele tensiuni auxiliare defazate cu $180^\circ - \beta$ în urma tensiunilor U_{12} și U_{32} :

— în cazul $\beta = 60^\circ$, avînd $180^\circ - \beta = 120^\circ$, tensiunile auxiliare sînt U_{23} , respectiv U_{13} , raportul U/U' fiind egal cu unitatea;

— în cazul $\beta = 90^\circ$, avînd $180^\circ - \beta = 90^\circ$, tensiunile auxiliare sînt U_{30} , respectiv U_{10} . analog cu cazul măsurării puterii reactive cu wattmetrele, deoarece contoarele cu $\beta = 90^\circ$ sînt de fapt contoare de energie activă; raportul tensiunilor U/U' este egal cu $\sqrt{3}$. Deoarece obținerea tensiunilor auxiliare în cazul $\beta = 90^\circ$ necesită crearea unui punct neutru artificial (cu o reacțanță identică cu cea a bobinelor de tensiune) ceea ce complică construcția contorului, au căpătat o răspîndire mai mare contoarele cu $\beta = 60^\circ$.

În circuitele trifazate cu conductor neutru, puterea reactivă fiind dată de expresia:

$$Q = U_{10} I_1 \sin(\widehat{U_{10} I_1}) + U_{20} I_2 \sin(\widehat{U_{20} I_2}) + U_{30} I_3 \sin(\widehat{U_{30} I_3}),$$

tensiunile auxiliare necesare sînt, respectiv:

— în cazul $\beta = 60^\circ$: U_{20}, U_{30}, U_{10} ; $U/U' = 1$;

— în cazul $\beta = 90^\circ$: U_{23}, U_{31} ; $U_{12}, U/U' = 1/\sqrt{3}$.

În figura 7-11 sînt reprezentate schemele legăturilor interioare ale unui contor de energie reactivă cu $\beta = 60^\circ$ pentru circuite trifazate cu și fără conductor neutru.

Dacă circuitul trifazat are simetrie totală, indiferent de faptul că este cu conductor neutru sau fără, energia reactivă se poate măsura cu un singur contor monofazat, avînd $\beta = 90^\circ$ (contor de energie activă), montat cu bobina de curent pe una din faze și cu bobina de tensiune între celelalte două faze.

Contoarele de energie reactivă, ca și contoarele de energie activă se pot monta prin intermediul transformatoarelor de măsurat. În acest caz circuitele de tensiune și de curent se alimentează separat de la circuitele secundare ale transformatoarelor de măsurat, respectîndu-se ordinea de succesiune a fazelor.

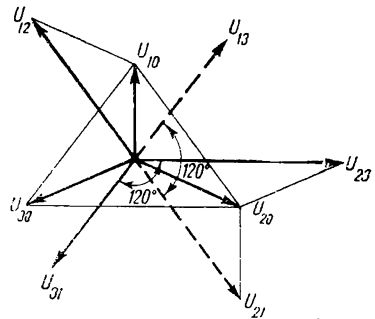


Fig. 7—10. Diagrama fazorială a tensiunilor trifazate simetrice.

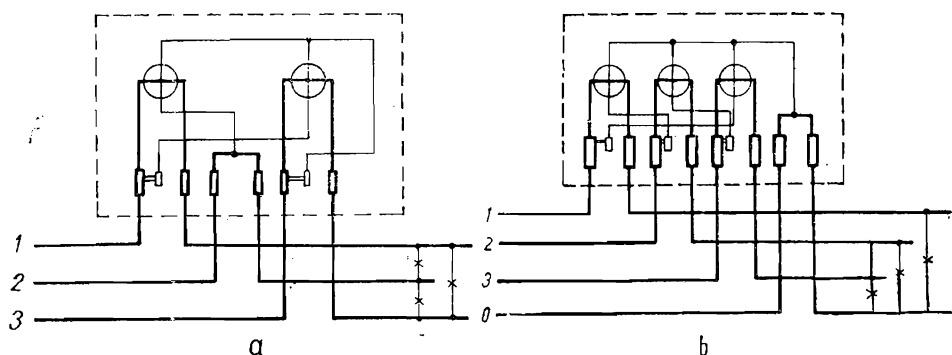


Fig. 7—11. Schema legăturilor interioare ale contoarelor trifazate de energie reactivă cu $\beta = 60^\circ$:

a — cu două dispozitive de măsurat în circuite trifazate fără conductor neutru; b — cu trei dispozitive de măsurat în circuite trifazate cu conductor neutru.

2. MĂSURAREA ENERGIEI REACTIVE CU CONTOARE SPECIALE DE ENERGIE REACTIVĂ — VARORĂMETRE

Varorămetrele sînt contoare de inducție astfel construite încît cuplul lor activ este proporțional cu puterea reactivă, adică înregistrează direct energia reactivă.

Proportionalitatea cuplului activ cu puterea reactivă se obține defazînd curentul I' prin bobina electromagnetului de curent E_c în urma curentului I din receptor prin șuntarea bobinei cu o rezistență neinductivă S (fig. 7-12, a) și micșorînd unghiul de defazaj β dintre tensiunea U aplicată bobinei de tensiune și fluxul său Φ_U cu ajutorul unei rezistențe adiționale R_{ad} montată în

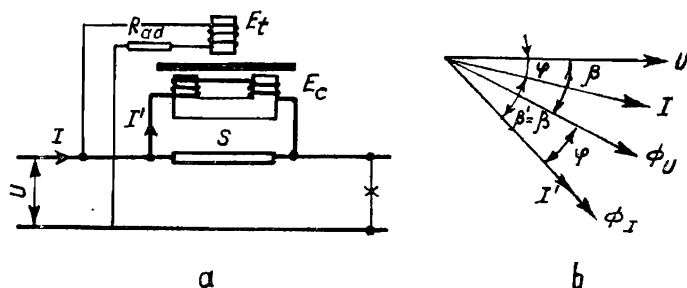


Fig. 7— 12. Varorămetrul monofazat.

circuitul bobinei de tensiune. Dacă se reglează rezistența șuntului S și rezistența adițională R_{ad} astfel încît unghiul β să fie egal cu unghiul de defazaj β' dintre fluxul de curent Φ_I și curentul I (fig. 7-12, b), rezultă între fluxurile Φ_I și Φ_U a celor doi electromagneți un defazaj φ egal cu cel dintre curentul I

și tensiunea U a circuitului de măsurare. În acest caz expresia cuplului activ devine:

$$\begin{aligned} M_a &= K\Phi_I\Phi_U \sin(\widehat{\Phi_I\Phi_U}) = Kc'Ic''U \sin(\varphi + \beta' - \beta) = \\ &= K'IU \sin \varphi = K'Q, \end{aligned} \quad (7-13)$$

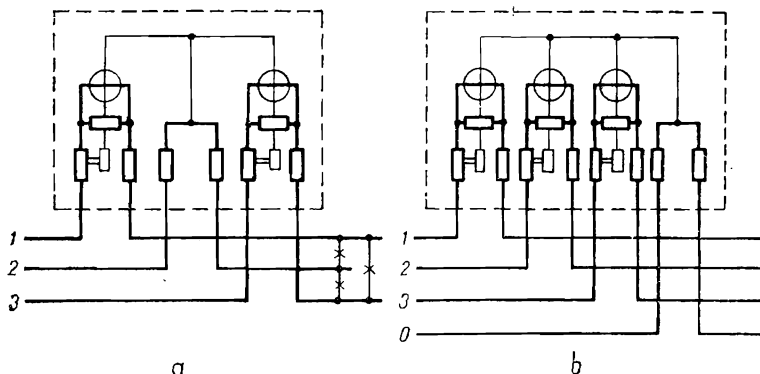


Fig. 7—13. Schema de montaj a varorămetrelor trifazate:

a — cu două dispozitive de măsurat în circuite trifazate fără conductor neutru; *b* — cu trei dispozitive de măsurat în circuite trifazate cu conductor neutru.

adică proporțional cu puterea reactivă. Sensul cuplului activ este inversat, de la fluxul Φ_U defazat înainte spre fluxul Φ_I ; de aceea pentru ca discul să se rotească în sens normal se inversează polaritatea tensiunii aplicate electromagnetului de tensiune.

Pe același principiu se construiesc și contoare trifazate cu două sau trei dispozitive de măsurat, care se montează asemănător cu schema contoarelor de energie activă (fig. 7-13) și care măsoară energia reactivă, indiferent de gradul de simetrie al circuitelor trifazate.

Capitolul VIII

MĂSURAREA FACTORULUI DE PUTERE ȘI A FRECVENȚEI

A. MĂSURAREA FACTORULUI DE PUTERE

Prin definiție, factorul de putere este raportul pozitiv și subunitar dintre puterea activă și cea aparentă: $K_p = \frac{P}{S}$.

În circuitele de curent alternativ sinusoidal factorul de putere este egal cu cosinusul unghiului de defazaj dintre curent și tensiune:

— pentru circuite monofazate:

$$K_p = \frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi; \quad (8-1)$$

— pentru circuite trifazate simetrice:

$$K_p = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\sqrt{3} UI} = \cos \varphi; \quad (8-2)$$

— pentru circuitele trifazate nesimetrice numai factorul de putere corespunzător fiecărei faze este egal cu cosinusul unghiului de defazaj, factorul de putere al circuitului trifazat nu are corespondent în acest sens.

În circuitele de curent alternativ nesinusoidal, factorul de putere nu mai este egal cu cosinusul unghiului de defazaj, în acest caz existînd diferite defazaje între armonicile de același ordin ale curentului și tensiunii din circuit.

Factorul de putere se poate determina indirect prin calcul, din valorile măsurate ale puterii, tensiunii și curentului din circuit sau direct, cu ajutorul aparatelor indicatoare numite fazmetre.

1. MĂSURAREA INDIRECTĂ A FACTORULUI DE PUTERE

În circuitele monofazate și trifazate simetrice de curent alternativ factorul de putere se determină indirect prin calcul cu relațiile (8-1) și (8-2) din indicațiile unui wattmetru care măsoară puterea activă P consumată, ale

unui voltmetru care măsoară tensiunea U aplicată și ale unui ampermetru care măsoară curentul I în circuit.

În circuitele trifazate simetrice, dacă puterea se măsoară prin metoda celor două wattmetre, factorul de putere se poate afla din indicațiile P_1 și P_2 ale celor două wattmetre, cu ajutorul relației:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\sqrt{3} (P_1 - P_2)}{P_1 + P_2}, \quad (8-3)$$

din care se deduce:

$$K_p = \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right)^2}}. \quad (8-4)$$

Există curbe sau nomograme care dau de-a dreptul valoarea factorului de putere în funcție de indicațiile P_1 și P_2 ale wattmetrelor.

În circuitele trifazate nesimetrice, factorul de putere se determină cu relația:

$$K_p = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P} \right)^2}}, \quad (8-5)$$

măsurînd puterea activă P și puterea reactivă Q , consumate în circuit.

În exploatarea instalațiilor electrice, pe lângă valoarea momentană a factorului de putere, este necesar să se cunoască și valoarea medie pe o anumită perioadă de timp; aceasta se determină din valorile energiei active W și reactive W_r , măsurate de un contor de energie activă și unul de energie reactivă, în perioada respectivă:

$$W = \int_0^t \sqrt{3} UI \cos \varphi dt = \frac{N_a}{C_a}, \quad (8-6)$$

$$W_r = \int_0^t \sqrt{3} UI \sin \varphi dt = \frac{N_r}{C_r},$$

unde N_a și N_r reprezintă numărul de rotații ale contoarelor efectuate în timpul t , iar C_a și C_r sînt constantele contoarelor.

Făcînd raportul:

$$\frac{W_r}{W} = \frac{(\sin \varphi)_{med}}{(\cos \varphi)_{med}} = (\operatorname{tg} \varphi)_{med} = \frac{N_r}{N_a} \frac{C_a}{C_r}, \quad (8-7)$$

de unde se deduce valoarea medie a factorului de putere:

$$K_{p \text{ med}} = (\cos \varphi)_{med} = \frac{W}{\sqrt{W^2 - W_r^2}}. \quad (8-8)$$

2. MĂSURAREA DIRECTĂ A FACTORULUI DE PUTERE. FAZMETRE

În condițiile de exploatare a stațiilor electrice sau în industrie, factorul de putere se măsoară direct cu ajutorul unor aparate indicatoare, numite *fazmetre* (sau *cosfimetre*). În majoritatea cazurilor se folosesc fazmetre electrodinamice, ferodinamice sau feromagnetice, avînd dispozitivul de măsurat de tip logometric.

În figura 8-1, *a* este reprezentată schema de principiu a unui fazmetru electrodinamic pentru circuite monofazate. Dispozitivul de măsurat logometric este cu cîmp magnetic uniform și constă dintr-o bobină fixă compusă din două jumătăți identice montate în serie în circuit și două bobine mobile B_1 și B_2 fixate rigid pe axul sistemului mobil sub un unghi de 90° și montate în derivație în circuit. În serie cu bobina B_1 este conectată o rezistență neinductivă R de valoare mare în comparație cu reactanța circuitului respectiv, astfel încît curentul I_1 din această bobină poate fi considerat în fază cu tensiunea aplicată U (fig. 8-1, *b*). În serie cu bobina B_2 este conectată o bobină de inductanță L avînd reactanța inductivă mare în comparație cu rezistența circuitului, astfel încît curentul I_2 din această bobină poate fi considerat defazat cu 90° în urma tensiunii aplicate.

În aceste condiții ecuația generală a scării logometrelor electrodinamice

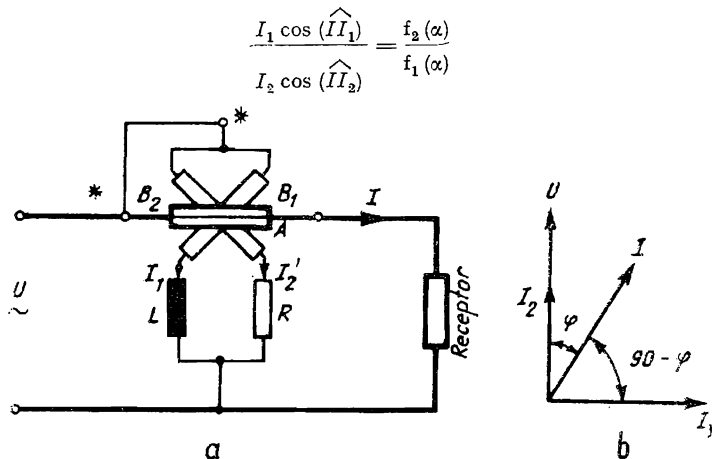


Fig. 8—1. Fazmetrul electrodinamic:

a — schema; *b* — diagrama fazorială.

devine:

$$\frac{I_1 \cos(90^\circ - \varphi)}{I_2 \cos \varphi} = \frac{M''_{12\max} \sin(\theta_0 + \alpha)}{M'_{12\max} \sin[(\theta_0 + 90^\circ) + \alpha]}$$

sau

$$\frac{I_1 \sin \varphi}{I_2 \cos \varphi} = \frac{M''_{12\max} \sin(\theta_0 + \alpha)}{M'_{12\max} \cos(\theta_0 + \alpha)}, \quad (8-9)$$

deoarece pentru logometrele electrodinamice cu cîmp uniform și bobinele mobile montate sub un unghi de 90° între ele, expresiile $f_1(\alpha)$ și $f_2(\alpha)$ a derivatelor $\frac{dM'_{12}}{d\alpha}$ și $\frac{dM''_{12}}{d\alpha}$ a inductanțelor mutuale M'_{12} și M''_{12} corespunzătoare celor două bobine încrucișate sînt:

$$f_1(\alpha) = \frac{dM'_{12}}{d\alpha} = M'_{12\max} \sin(\theta_0 + \alpha);$$

$$f_2(\alpha) = \frac{dM''_{12}}{d\alpha} = M''_{12\max} \sin[\theta_0 + 90^\circ + \alpha].$$

Dacă constructiv bobinele mobile sînt identice ($M'_{12\max} = M''_{12\max}$) și astfel așezate încît unghiul inițial θ_0 dintre planul bobinei B_2 și planul bobinei fixe să fie zero ($\theta_0 = 0$) și dacă impedanțele circuitelor lor sînt egale astfel încît $I_1 = I_2$, ecuația scării (8-9) devine:

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (8-10)$$

de unde rezultă $\alpha = \varphi$, adică deviația sistemului mobil al fazmetrului este egală cu unghiul de defazaj dintre curentul și tensiunea din circuitul de măsurare și nu depinde de valorile acestora.

La schimbarea semnului defazajului φ în funcție de caracterul inductiv sau capacitiv al sarcinii se schimbă și sensul unghiului de deviație a sistemului mobil. Ca urmare, fazmetrele electrodinamice au scara bilaterală, grația zero fiind la mijloc, cu o extindere pînă la 180° .

Scara fazmetrului electrodinamic poate fi gradată în unități de unghi, în care caz ea este uniformă, sau în unități ale factorului de putere ($\cos \varphi$), în care caz ea este neuniformă.

Pentru obținerea unei dilatări a scării în domeniul $\cos \varphi = 0,9 \dots 1$ inductiv și capacitiv bobinele mobile se fixează sub un unghi mai mic decît 90° și se aleg parametrii circuitelor lor astfel încît curenții să fie diferiți ($I_2 \neq I_1$).

Prezența în circuitul bobinei mobile B_1 a reactanței inductive mari ωL face ca indicațiile fazmetrului electrodinamic să depindă de frecvență, deoarece, în acest caz, curentul I_2 și defazajul acestuia față de tensiunea $\bar{U}$ variază. De aceea, fazmetrele se gradează de obicei pentru o anumită frecvență.

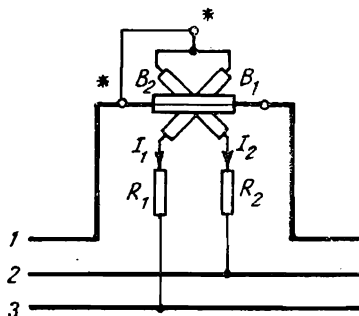


Fig. 8—2. Schema de montaj a fazmetrului trifazat.

Fazmetrul electrodinamic poate fi utilizat și în circuitele trifazate simetrice și echilibrate. În acest caz, ambele bobine mobile sînt legate în serie cu cîte o rezistență neinductivă, de valori egale — și formează între ele un unghi de 60° , pentru ca scara aparatului să fie uniformă. Bobina fixă a fazmetrului se montează în serie pe una din faze, iar bobinelor mobile li se aplică tensiunile dintre faza respectivă și celelalte două faze (fig. 8-2).

B. MĂSURAREA FRECVENȚEI

În funcție de domeniul de frecvențe de măsurat, de precizia care se cere și de alte condiții impuse, frecvența se măsoară prin metode și cu aparate destul de variate. Măsurarea cu mare precizie atît a frecvențelor înalte cît și a celor joase se face de obicei prin metode indirecte fie prin comparație cu un generator de frecvență etalon, fie prin metode de punte. Măsurarea cu o precizie mai scăzută a frecvențelor joase se face cu ajutorul aparatelor indicate numite *frecvențmetre*.

1. MĂSURAREA FRECVENȚEI PRIN METODE DE PUNTE

Măsurarea frecvenței prin metode de punte se efectuează cu ajutorul punților de curent alternativ la care condițiile de echilibru depind de frecvența sursei de alimentare. Dintre aceste punți, cele mai utilizate sînt puntea de rezonanță și puntea Wien-Robinson.

a) **Puntea de rezonanță** (fig. 8-3) conține în trei din brațele sale cîte o rezistență neinductivă (R_1 , R_2 și R_3), iar în al patrulea braț o bobină cu rezistență R și inductanța L cunoscute și un condensator etalon C fără pierderi în dielectric, variabil, cu care se aduce la rezonanță circuitul LC . La echilibrul punții, care se obține variind rezistența R_3 și condensatorul etalon C , sînt satisfăcute condițiile:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad \text{și} \quad LC\omega^2 = 1, \quad (8-11)$$

de unde rezultă valoarea frecvenței de măsurat:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (8-12)$$

b) **Puntea Wien — Robinson** constă din patru rezistențe nereactive R_1 , R_2 , R_3 și R_4 și două condensatoare etalon C_1 și C_2 variabile, montate ca în figura 8-4. Condițiile de echilibru ale punții sînt:

$$R_4 \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = R_3 \left(R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} \right), \quad (8-13)$$

de unde, egalînd părțile reale și imaginare, se obține:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \quad \text{și} \quad C_1 C_2 R_1 R_2 \omega^2 = 1. \quad (8-14)$$

Dacă se aleg parametrii punții astfel ca $C_1 = C_2 = C = \text{constant}$, $R_1 = R_2 = R$ (variabil) și $R_4 = 2R_3 = \text{constant}$, este îndeplinită prima egalitate a relațiilor (8-14), iar din a doua egalitate rezultă frecvența de măsurat:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (8-15)$$

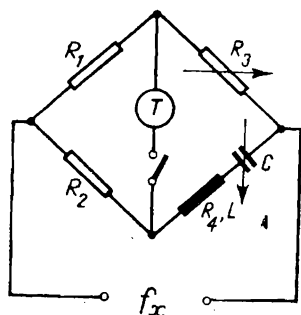


Fig. 8—3. Puntea de rezonanță.

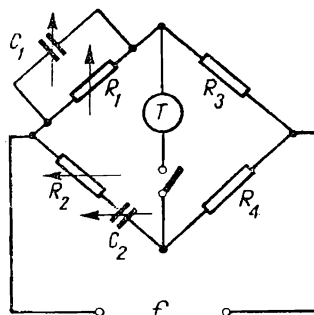


Fig. 8—4. Puntea Wien—Robinson.

Pentru echilibrarea comodă a punții, rezistențele R_1 și R_2 sînt cuplate variindu-se simultan cu ajutorul unei singure manete, astfel ca mereu să se păstreze egalitatea $R_1 = R_2$.

Cu ajutorul punților se pot măsura frecvențe cuprinse în domeniul 20—20 000 Hz, cu precizii de ordinul 0,1—0,3%. Ca indicator de nul, în cazul măsurării frecvențelor cuprinse între 300 și 500 Hz se utilizează casca telefonică. La aceste măsurări o sursă de erori constă în faptul că de foarte multe ori frecvența de măsurat aparține unor tensiuni care nu sînt pur sinusoidale, ci au un conținut oarecare de armonice, ceea ce face ca în diagonala de măsură a punții, tensiunea să nu fie niciodată nulă. În asemenea cazuri interesează frecvența unei fundamentale de măsurat care se determină la extincția tonului fundamental pentru care sunetul în casca telefonică trece printr-un minim.

2. MĂSURAREA FRECVENȚEI PRIN METODE DE COMPARAȚIE

Măsurarea frecvenței prin metode de comparație constă în compararea frecvenței de măsurat cu o frecvență etalon dată de un generator de frecvență etalon, care poate fi un generator cu diapazon (pentru frecvențe joase) sau un generator cu cuarț (pentru frecvențe înalte și foarte înalte). Pentru comparație se folosește osciloscopul catodic, un disc strôboscopic sau un aparat de măsurat cu redresor.

Funcționarea generatorului cu diapazon se bazează pe generarea oscilațiilor electrice, într-o schemă electronică oarecare cu ajutorul unui diapazon

în condiții de temperatură stabilă și alimentînd generatorul de la o sursă stabilizată.

Funcționarea generatorului cu cuarț se bazează pe generarea oscilațiilor electrice într-o schemă electronică oarecare cu ajutorul unei plăcuțe de cristal de cuarț, care oscilează (datorită efectului piezoelectric) într-un câmp electric alternativ.

Determinarea frecvenței cu ajutorul oscilatorului catodic se poate face prin mai multe metode, dintre care cele mai răspîndite sînt: metoda modulației anodice și metoda figurilor lui Lissajous.

a) **Metoda modulației anodice** se bazează pe deviația fasciculului de electroni sub acțiunea unei tensiuni alternative aplicate anodului de accelerare.

În figura 8-5, *a* este reprezentată schema conectării tubului catodic pentru măsurarea frecvenței prin această metodă. Frecvența etalon f_0 se aplică plăcilor de deviere ale tubului catodic prin intermediul unui circuit de defazare alcătuit dintr-un condensator C în serie cu o rezistență R . Căderile de tensiune în rezistență și în condensator, care se aplică plăcilor de deviere verticală, respectiv plăcilor de deviere orizontală, sînt defazate cu 90° . În cazul egalității amplitudinilor lor și pentru o tensiune anodică constantă, fasciculul de electroni descrie pe ecranul tubului un cerc luminos.

Dacă anodului de accelerare, pe lângă tensiunea continuă, i se aplică tensiunea alternativă a cărei frecvență f_x se măsoară, tensiunea rezultantă va avea valori mai mari sau mai mici decît tensiunea continuă, după cum amplitudinile pozitive și negative ale tensiunii alternative se adună sau se scad din aceasta. Diametrul cercului descris de fasciculul de electroni pe ecran fiind invers proporțional cu mărimea tensiunii anodice de accelerare, imaginea circulară se transformă în acest caz într-o imagine dantelată (fig. 8-5, *b*) ale cărei maxime și minime se înscriu pe cercurile limită corespunzătoare valorilor maxime și minime ale tensiunii de accelerare. Numărul maximelor, respectiv al minimelor figurii dantelate, depinde de raportul frecvențelor $\frac{f_0}{f_x}$. Figura este stabilă cînd raportul frecvențelor este egal cu raportul

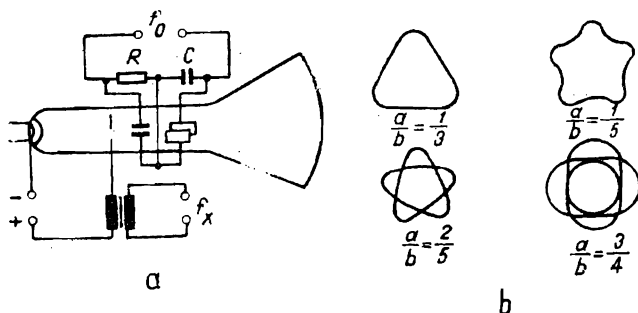


Fig. 8—5. Schema de măsurare a frecvenței prin metoda modulației.

a două numere întregi $\frac{a}{b} \left(\frac{f_0}{f_x} = \frac{a}{b} \right)$. Dacă această condiție nu este îndeplinită, figura se rotește cu o viteză care depinde de diferența $f_0 - f_x \frac{a}{b}$. Numărînd maximele și buclele figurii se determină raportul dintre frecvențe. Pentru a se obține figuri stabile, se reglează frecvența etalon f_0 .

b) **Metoda figurilor lui Lissajous** se bazează pe faptul că forma curbelor descrise pe ecranul tubului catodic de fasciculul de electroni depinde de raportul dintre frecvențele tensiunilor aplicate plăcilor de deviere. Aplicînd la o pereche de plăci tensiunea de frecvență etalon f_0 și la cealaltă pereche de plăci tensiunea a cărei frecvență f_x se măsoară, după forma figurii lui Lissajous (fig. 8-6) se poate stabili valoarea frecvenței f_x . Pentru ca figura să fie stabilă, este necesar ca cele două frecvențe să fie într-un raport egal cu raportul a două numere întregi. În acest scop se reglează frecvența etalon f_0 pînă la obținerea unui anumit raport cunoscut. Cel mai simplu este să se regleze frecvența etalon astfel încît să fie egală cu cea de măsurat. În acest caz figura lui Lissajous este o linie, o elipsă sau un cerc, în funcție de defazajul dintre cele două tensiuni aplicate plăcilor de deviere.

După cum se vede, atît în această metodă cît și în cea precedentă, osciloscopul catodic nu servește ca aparat de măsurat, ci ca indicator al obținerii unui raport dat între frecvența etalon și cea de măsurat.

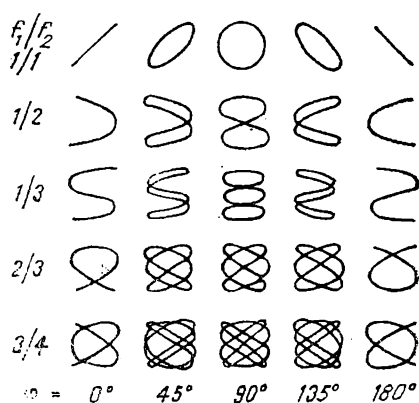


Fig. 8—6. Figurile lui Lissajous.

3. FRECVENȚMETRE

Măsurarea frecvenței cu o precizie mai mică, dar rapid și simplu, se face cu ajutorul aparatelor indicatoare numite *frecvențmetre*. În funcție de domeniul frecvențelor pe care le măsoară, de precizia cerută și de destinație, frecvențmetrele sînt de diferite tipuri: cu lame vibrante sau cu ac indicator, feromagnetice, electrodinamice, ferodinamice etc. În marea lor majoritate, aceste aparate se bazează pe fenomenul de rezonanță mecanică (frecvențmetrele cu lame vibrante) sau electrică (frecvențmetrele cu ac indicator).

a) **Frecvențmetre cu lame vibrante.** Frecvențmetrele cu lame vibrante sînt dispozitive de măsurat feromagnetice rezonante, la care sistemul mobil este format din o serie de lame de oțel cu frecvențe proprii diferite, asupra cărora acționează direct sau indirect, cîmpul magnetic alternativ produs de un electromagnet prin a cărui înfășurare trece curentul alternativ a cărui frecvență se măsoară.

În figura 8-7 este reprezentat schematic construcția *frecvențmetrului cu acționare directă*. Frecevențmetrul se compune din unul sau mai mulți electromagneți 1; de o parte și de alta a electromagneților sînt așezate două rînduri de lame de oțel 2, fixate cu un capăt pe un suport 3. Capătul liber al lamelor este îndoit la 90° , partea exterioară fiind vopsită în alb. Fiecare lamă are o frecvență proprie de vibrație, egală cu dublul frecvenței de măsurat corespunzătoare. Astfel frecvențmetrele cu domeniul de măsurare 45--55 Hz posedă în general, 21 de lame din 0,5 în 0,5 Hz, avînd frecvențele proprii de vibrație cuprinse între 90 și 110 Hz.

La alimentarea electromagnetului 1 cu curentul alternativ a cărui frecvență se măsoară, acesta atrage lamele de două ori în decursul unei perioade, făcîndu-le astfel să vibreze cu o frecvență dublă frecvenței de măsurat. Amplitudinea vibrațiilor lamelor este foarte redusă (aproape de neobservat) cu excepția a 1-3 lamele a căror frecvență proprie de oscilație este egală sau apropiată de dublul frecvenței curentului de măsurat, care, intrînd în rezonanță, vibrează cu amplitudine mare, vizibilă de la distanță.

În figura 8-8 este reprezentată schematic construcția *frecvențmetrului cu acționare indirectă*. La aceste aparate, electromagnetul 1 acționează asupra unei plăci feromagnetice 2, a cărei vibrație se transmite la lamele vibrante 3 prin intermediul unei bare transversale 4 fixată de lamele elastice 5. Ca și în cazul frecvențmetrului cu acționare directă, lama a cărei frecvență proprie de oscilație coincide cu dublul frecvenței curentului de măsurat, intră în rezonanță, avînd amplitudinea vibrațiilor maximă.

La frecvențmetrele cu acționare indirectă, în locul electromagnetului obișnuit se poate utiliza un electromagnet polarizat în care miezul de fier este înlocuit cu un magnet permanent al cărui flux slăbește, respectiv întărește fluxul dat de curentul alternativ în cursul a două semiperioade vecine cu rezultatul că lamelele sînt atrase numai o singură dată într-o perioadă și astfel vibrează cu frecvența curentului de măsurat. Ca urmare se construiesc frecvențmetre cu două domenii de măsurare, avînd doi electromag-

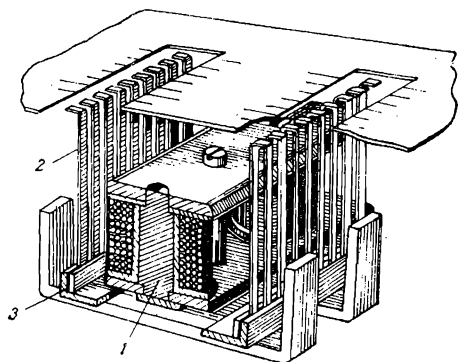


Fig. 8-7. Frecevențmetrul cu lame vibrante cu acționare directă.

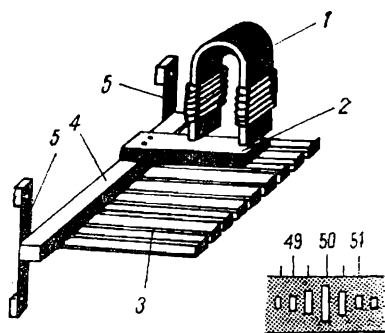


Fig. 8-8. Frecevențmetrul cu lame vibrante cu acționare indirectă.

neți (unul polarizat pentru frecvența f și altul nepolarizat pentru frecvența $f/2$) și lamelele cu frecvență proprie de vibrație egală cu f .

Frecvențmetrele cu acționare indirectă, deși sînt mai complicate constructiv, prezintă avantajul că necesită un electromagnet mult mai mic și ca urmare consumul propriu este mult redus față de frecvențmetrele cu acționare directă. Aceste frecvențmetre au însă o sensibilitate mai mare.

Frecvențmetrele cu lame vibrante prezintă dezavantajul unui reglaj dificil al frecvenței proprii de vibrație a lamelor ($\pm 0,2\%$ pentru frecvențe de aproximativ 50 Hz), ceea ce face ca precizia lor să fie de maximum $0,5-1\%$.

Frecvențmetrele cu lame vibrante, cu acționare directă se construiesc pentru frecvențe pînă la 1 500 Hz, iar cele cu acționare indirectă pentru frecvențe între 10 și 100 Hz.

b) **Frecvențmetre cu ac indicator.** Frecvențmetrele cu ac indicator sînt dispozitive de măsurat logometrice, la care unul din curenții ce formează raportul măsurat este funcție de frecvență datorită existenței în circuitul respectiv a unui circuit de rezonanță compus dintr-o rezistență, o inducțanță și o capacitate, acordat astfel încît să intre în rezonanță la frecvența de măsurat sau apropiată de aceasta. După tipul dispozitivului de măsurat se construiesc frecvențmetre cu ac indicator electrodinamice, ferodinamice sau feromagnetice.

În figura 8-9, *a* este reprezentată schema de principiu a unui frecvențmetru ferodinamic de tip logometric cu întrefier uniform. Bobina fixă a acestui aparat este legată în serie cu o bobină de inducțanță L și un condensator C , formînd împreună circuitul de rezonanță. Sistemul mobil este alcătuit din două bobine coaxiale: una din bobine B_2 este închisă pe o reactanță

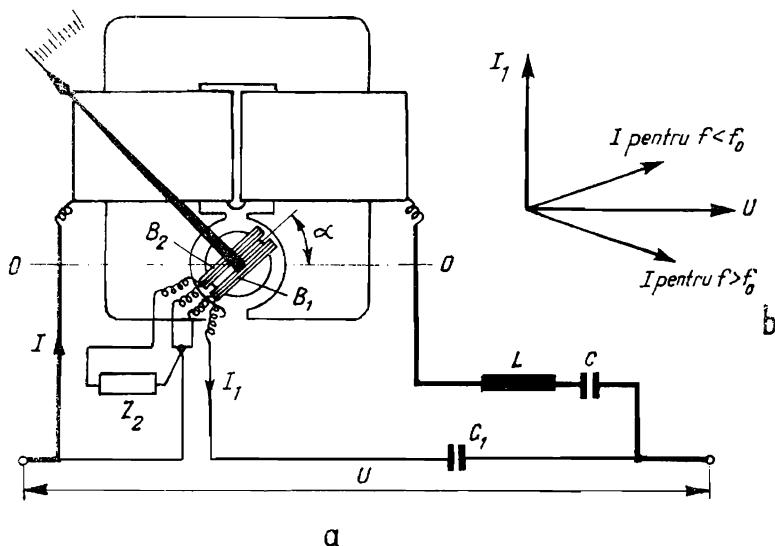


Fig. 8—9. Frecvențmetrul ferodinamic;

a — schema; b — diagrama fazorială.

inductivă Z_2 și servește la realizarea cuplului rezistent, iar cealaltă bobină B_1 este legată în serie cu un condensator C_1 și produce cuplul activ. Frecvențmetrul se conectează în circuit în derivație, la fel ca un voltmetru, la bornele sale aplicându-se tensiunea rețelei U .

Pentru o frecvență medie f_0 a domeniului de măsurare circuitul bobinei fixe intrînd în rezonanță, curentul I este în fază cu tensiunea U . Rezistența bobinei B_1 fiind foarte mică în comparație cu reactanța $\frac{1}{\omega_0 C_1}$ a condensatorului C_1 , curentul I_1 este defazat cu 90° înaintea tensiunii U . Ca urmare, pentru frecvența medie f_0 cuplul activ care acționează asupra bobinei B_1 este:

$$M_{1med} = K_1 I I_1 \cos(\widehat{II}_1) = K_1 I I_1 \cos 90^\circ = 0, \quad (8-16)$$

deoarece $\cos(\widehat{II}_1) = \cos 90^\circ = 0$.

În același timp, sistemul mobil, sub acțiunea cuplului rezistent, se așază astfel încît planul bobinei B_2 să coincidă cu linia neutră $O - O$.

Dacă frecvența de măsurat f diferă de frecvența de rezonanță f_0 defazajul dintre curenții I și I_1 diferă de 90° și, ca urmare, apare un cuplu activ, sub acțiunea căruia sistemul mobil se rotește din poziția corespunzătoare liniei neutre, pînă cînd cuplul rezistent egalează cuplul activ. Sistemul mobil deviază într-un sens sau în altul după cum frecvența de măsurat este mai mare sau mai mică decît frecvența de rezonanță. În acest mod, fiecărei valori a frecvenței (în limitele domeniului de măsurare a frecvențmetrului) îi corespunde o anumită poziție a sistemului mobil, determinată de o anumită indicație a acului aparatului.

Domeniul de măsurare al acestor aparate este redus (de exemplu: 48—52 Hz sau 50—55 Hz). Experiența a arătat că astfel de frecvențmetre ferodinamice se pot construi pentru frecvențe medii cuprinse între 15 și 2 000 Hz.

Prezența circuitului de rezonanță în circuitul de măsurare a frecvențmetrului face ca aparatul să fie puțin sensibil la armonicele superioare, ceea ce constituie calitatea importantă a acestor aparate.

Capitolul IX

MĂSURAREA MĂRIMILOR MAGNETICE

Necesitatea studierii materialelor feromagnetice, a stabilirii caracteristicilor lor magnetice (flux magnetic, inducția magnetică, intensitatea cîmpului magnetic, pierderile prin fenomenul histerezis și curenți tubionari etc.) a determinat dezvoltarea unui domeniu separat al măsurărilor electrice, și anume măsurarea mărimilor magnetice.

Măsurarea mărimilor magnetice este strîns legată de măsurarea mărimilor electrice, această legătură rezultînd din interdependența fenomenelor electrice și magnetice, componente ale aceluiași proces electromagnetic.

La determinarea caracteristicilor magnetice ale materialelor feromagnetice aproape totdeauna ca rezultat al măsurării se obține o mărime electrică sau un parametru electric al materialului de încercat, cu ajutorul căruia folosind apoi relațiile cunoscute între mărimile electrice și magnetice se calculează acestea din urmă.

În general în măsurările magnetice se măsoară fluxul magnetic, cu ajutorul căruia se determină prin calcul celelalte mărimi și caracteristici magnetice (inducția, intensitatea cîmpului magnetic, curba de magnetizare, ciclul de histerezis).

A. MĂSURAREA FLUXULUI MAGNETIC

Fluxul magnetic se măsoară direct prin metoda balistică. Această metodă se bazează pe măsurarea cantității de electricitate a impulsului de curent, care se induce în circuitul de măsurat la variația fluxului magnetic care străbate circuitul. Circuitul de măsurat se execută în mod obișnuit sub forma unei bobine plate de sîrmă, numită *bobina de măsurat*. Dimensiunile și numărul de spire ale bobinei de măsurat sînt determinate de condițiile de măsurare. Variația fluxului care străbate bobina de măsurat se realizează fie prin depărtarea din cîmp a acesteia, fie prin schimbarea poziției ei în cîmp, fie prin schimbarea direcției fluxului față de bobină etc.

Variația de flux $d\Phi$ dă naștere în bobina de măsurat (avînd n spire) unei forțe electromotoare proporțională cu viteza de variație a fluxului magnetic:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt}. \quad (9-1)$$

Această forță electromotoare este echilibrată de căderea de tensiune activă iR și inductivă $L \frac{di}{dt}$ în circuitul de măsurat (R și L fiind rezistența și inductanța acestuia):

$$-n \frac{d\Phi}{dt} = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (9-2)$$

Integrînd această expresie în intervalul de timp de la momentul inițial t_1 pînă la momentul final t_2 al variației fluxului și ținînd seama de faptul că în aceste momente curentul i este egal cu zero și în consecință la o valoare constantă a lui L integrala ultimului termen al expresiei este egală cu zero, se obține:

$$-n \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\Phi}{dt} dt = R \int_{t_1}^{t_2} i dt. \quad (9-3)$$

Integrala din partea stîngă a acestei expresii reprezintă variația fluxului $\Delta\Phi$ în intervalul de timp $t_2 - t_1$, iar integrala din partea dreaptă reprezintă cantitatea de electricitate Q care trece prin circuitul de măsurat în același interval de timp. Ca urmare se poate scrie:

$$-n\Delta\Phi = RQ. \quad (9-4)$$

Deoarece nu interesează direcția variației fluxului, ci doar valoarea lui absolută, se poate renunța la semnul minus și atunci fluxul magnetic de măsurat va fi:

$$\Delta\Phi = \frac{R}{n} Q. \quad (9-5)$$

Deci cantitatea de electricitate care trece prin circuitul de măsurat este proporțională cu variația fluxului magnetic. Această cantitate de electricitate poate fi măsurată cu ajutorul galvanometrului balistic sau fluxmetrului.

1. MĂSURAREA FLUXULUI MAGNETIC CU GALVANOMETRUL BALISTIC

Pentru măsurarea fluxului magnetic cu ajutorul galvanometrului balistic este necesar ca variația fluxului să se facă într-un interval de timp scurt, mult mai mic decît perioada oscilațiilor libere ale galvanometrului. În acest

caz valoarea primei deviații (maximă) a galvanometrului α_m este proporțională cu cantitatea de electricitate care a trecut prin bobina de măsurat:

$$Q = C_b \alpha_m, \quad (9-6)$$

unde C_b este constanta balistică a galvanometrului.

Înlocuind în ecuația (9-5) valoarea lui Q cu expresia (9-6), se obține:

$$\Delta\Phi = \frac{RC_b}{n} \alpha_m. \quad (9-7)$$

Din această relație se observă că variația fluxului magnetic este proporțională cu deviația maximă a galvanometrului balistic.

Dacă bobina de măsurat se rotește cu 90° sau dacă se scoate brusc din câmpul magnetic, sau se întrerupe curentul, fluxul variază de la valoarea Φ la zero și deci $\Delta\Phi = \Phi$. Dacă bobina de măsurat se rotește cu 180° sau se inversează curentul, fluxul variază de la $+\Phi$ la $-\Phi$ și deci $\Delta\Phi = 2\Phi$. În acest mod se determină imediat valoarea fluxului Φ înlocuind în relația (9-7) valorile lui $\Delta\Phi$.

Constanta balistică C_b depinde de rezistența circuitului în care este conectat galvanometrul, adică de rezistența R a circuitului de măsurat. În practica măsurărilor magnetice nu se folosește însă această constantă, care se exprimă în unități de cantitate de electricitate, ci se consideră drept constantă numărătorul relației (9-7): $C'_b = RC_b$, definit în unități de flux pe diviziune de scară gradată. În acest fel, relația (9-7) devine:

$$\Delta\Phi = \frac{C'_b}{n} \alpha_m. \quad (9-8)$$

Constanta balistică C'_b se determină experimental pentru fiecare circuit de măsurat. Pentru acest motiv, schema metodei balistice pentru măsurarea fluxului magnetic cu galvanometrul balistic constă dintr-un circuit de măsurat I și un circuit II pentru determinarea constantei balistice (fig. 9-1).

În circuitul de măsurat bobina galvanometrului balistic GB este legată în serie cu bobina de măsurat n , reostatul R_1 pentru reglajul sensibilității galvanometrului și înfășurarea secundară a bobinei de inductanță mutuală M , care servește la determinarea constantei balistice.

Circuitul II pentru determinarea constantei balistice constă din înfășurarea primară a bobinei de inductanță mutuală, ampermetrul A , reostatul R_2 și sursa de curent continuu E (de obicei o baterie de acumulatori de 6–12 V).

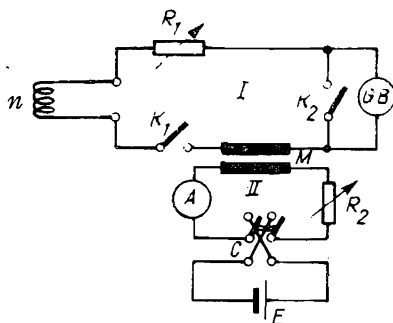


Fig. 9—1. Schema de măsurare a fluxului magnetic cu galvanometrul balistic.

La închiderea sau deschiderea comutatorului C în circuitul bobinei de inducțanță mutuală are loc o variație de flux magnetic $\Delta\Phi_{12}$ corespunzătoare variației curentului primar I_1 :

$$\Delta\Phi_{12} = MI_1, \quad (9-9)$$

în care M este inductanța mutuală (în henry).

Prima deviație α_b a galvanometrului balistic este proporțională cu această variație de flux:

$$\Delta\Phi_{12} = C'_b \alpha_b. \quad (9-10)$$

Din relațiile (9-9) și (9-10) rezultă imediat constanta balistică corespunzătoare circuitului de măsurat de rezistență R :

$$C'_b = C_b R = M \frac{I_1}{\alpha_b} \left[\frac{\text{Weber}}{\text{diviz.}} \right]. \quad (9-11)$$

Constanta balistică se determină atât la stabilirea și întreruperea curentului în circuitul de măsurat cât și la inversarea sensului curentului, adoptîndu-se pentru ea media valorilor obținute.

2. MĂSURAREA FLUXULUI MAGNETIC CU FLUXMETRUL

Fluxmetrul este un aparat de tip magnetoelectric destinat măsurării directe a fluxului magnetic. Se deosebește de galvanometrul magnetoelectric obișnuit prin aceea că cuplul său rezistent este practic nul, datorită faptului că nu posedă arcuri spirale sau fir de suspensie metalic. Bobina mobilă este suspendată pe pivoți, care se mișcă cu frecări foarte mici în lagăre cu pietre prețioase, aducerea curentului făcîndu-se cu ajutorul a două fire metalice extrem de fine și suple formînd bucle largi pentru ca prin ușoara lor îndoire provocată de mișcarea bobinei să nu se producă un cuplu rezistent.

Ca o consecință, în stare de repaus bobina mobilă poate rămîne în echilibru în orice poziție și deci acul indicator se poate găsi în orice punct al scării.

Fluxmetrul se deosebește de galvanometrul balistic și prin aceea că bobina de măsurat la care se conectează are o rezistență redusă (maximum 10—30 Ω), mult mai mică decît rezistența critică exterioară de amortizare cu care se construiește aparatul. Ca urmare, fluxmetrele funcționează în condiții de supraamortizare foarte puternică, adică curenții care se induc în bobina mobilă, din cauza mișcării acesteia, în cîmpul magnetic al magnetului permanent, produc un cuplu de amortizare foarte puternic, care frînează considerabil mișcarea bobinei.

Aceste două deosebiri fac ca fluxmetrul să aibă o serie de calități prețioase și îi permit o mînuire mult mai ușoară decît galvanometrul balistic. Față de acesta, însă este mai puțin sensibil. De asemenea, indicațiile sale

nu depind nici de viteza de variație a fluxului magnetic, cum se întâmplă în cazul galvanometrului balistic, deoarece constanta sa este invariabilă în limite foarte mari ale vitezei de variație a fluxului.

Pentru măsurarea fluxului magnetic fluxmetrul se conectează cu bobina de măsurat B_m (fig. 9-2). Cele două conductoare de legătură dintre fluxmetru și bobina de măsurat se răsucesc împreună, pentru a se evita formarea unei bucle prin care ar putea trece fluxuri parazite, care să influențeze măsurarea. Introducând bobina în câmpul magnetic de măsurat, când are loc variația de flux $\Delta\Phi$ (fie producând o variație a curentului de excitație a electromagnetului, bobina de măsurat stînd pe loc, fie scoțind brusc bobina de măsurat din câmpul magnetic), în ea se induce o forță electromotoare, proporțională cu variația de flux magnetic care o străbate. Forța electromotoare dă naștere unui curent de scurtă durată (un impuls de curent) în circuitul bobinei fluxmetrului B_f , care găsindu-se în câmpul magnetului permanent al aparatului se rotește. Rotirea se face pînă la o poziție la care variația fluxului $\Delta\Phi_f$ în bobina mobilă a fluxmetrului compensează variația fluxului în bobina de măsurat (deoarece fluxul magnetic al unui circuit închis tinde să se păstreze invariabil). Câmpul magnetic în întrefierul fluxmetrului în care se găsește bobina mobilă, fiind radial și uniform, variația fluxului total la rotirea acesteia cu un unghi α este:

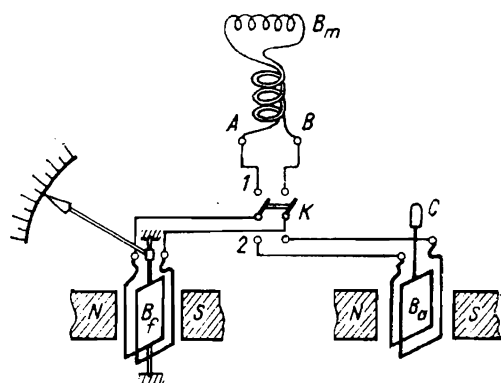


Fig. 9—2. Schema fluxmetrului.

de măsurat, când are loc variația de flux $\Delta\Phi$ (fie producând o variație a curentului de excitație a electromagnetului, bobina de măsurat stînd pe loc, fie scoțind brusc bobina de măsurat din câmpul magnetic), în ea se induce o forță electromotoare, proporțională cu variația de flux magnetic care o străbate. Forța electromotoare dă naștere unui curent de scurtă durată (un impuls de curent) în circuitul bobinei fluxmetrului B_f , care găsindu-se în câmpul magnetului permanent al aparatului se rotește. Rotirea se face pînă la o poziție la care variația fluxului $\Delta\Phi_f$ în bobina mobilă a fluxmetrului compensează variația fluxului în bobina de măsurat (deoarece fluxul magnetic al unui circuit închis tinde să se păstreze invariabil). Câmpul magnetic în întrefierul fluxmetrului în care se găsește bobina mobilă, fiind radial și uniform, variația fluxului total la rotirea acesteia cu un unghi α este:

$$n_f \Delta\Phi_f = n_f BS\alpha. \quad (9-12)$$

Deci la poziția de echilibru se poate scrie:

$$n\Delta\Phi = n_f \Delta\Phi_f = n_f BS\alpha, \quad (9-13)$$

de unde:

$$\Delta\Phi = \frac{n_f BS}{n} \alpha = \frac{C_f}{n} \alpha, \quad (9-14)$$

în care:

n_f și S sînt numărul de spire și secțiunea bobinei mobile a fluxmetrului;

B — inducția în întrefierul fluxmetrului;

$C_f = n_f BS$ — constanta fluxmetrului;

n — numărul de spire ale bobinei de măsurat.

Din relația (9-14) rezultă că deviația α a fluxmetrului este proporțională cu variația fluxului magnetic $\Delta\Phi$ în bobina de măsurat, iar constanta sa C_f este independentă de valoarea rezistenței exterioare pe care se închide fluxmetrul.

Ca urmare a independenței constantei fluxmetrului de rezistență exterioară, scara acestuia se gradează direct în unități de flux magnetic (de obicei avînd $C_f = 10^{-4}$ weberi/diviziune).

Această proprietate deosebit de importantă a constantei fluxmetrului este valabilă însă numai pentru valori mici ale rezistenței exterioare (sub 10—30 Ω). De aceea pe cadranul fluxmetrelor este indicată de obicei rezistența exterioară maximă a circuitului pe care poate fi racordat aparatul pentru care constanta rămîne invariabilă și deci erorile de măsurare vor fi sub limita admisă.

Deviația fluxmetrului este independentă de viteza de variație a fluxului magnetic în limite foarte mari ale acestuia. Aceasta este o calitate prețioasă a fluxmetrului deoarece înlătură necesitatea variației bruște a fluxului (lucru care nu este posibil totdeauna), condiție indispensabilă la galvanometrul balistic.

Citirile indicațiilor fluxmetrului se fac cu mare precizie, deoarece, după ce a deviat, acul indicator rămîne pe loc, pe cînd la galvanometrul balistic trebuie să se citească deviația maximă a acului în mișcare, ceea ce constituie o greutate și o sursă de inexactități. Pentru aducerea acului la diviziunea zero a scării, fluxmetrul este prevăzut cu un al doilea magnet, între ai cărui poli se găsește o bobină auxiliară B_4 . Punînd comutatorul K pe poziția 2, se rotește bobina auxiliară cu ajutorul corectorului C (scos pe capacul aparatului). La rotirea bobinei auxiliare, în circuitul bobinei fluxmetrului are loc variația fluxului magnetic, pentru compensarea căruia aceasta începe să se rotească într-o parte sau în alta, ceea ce permite să se aducă acul aparatului la gradația zero a scării.

B. DETERMINAREA CURBEI DE MAGNETIZĂRE ȘI A CICLULUI DE HISTEREZIS

Caracteristicile principale ale materialelor feromagnetice se determină din curba de magnetizare și ciclul de histerezis, care arată dependența inducției în material de intensitatea cîmpului magnetic.

Curba de magnetizare (curba OAM din figura 9-3) exprimă variația inducției magnetice B în funcție de intensitatea cîmpului magnetic H în cazul magnetizării unui material (în prealabil demagnetizat) la o creștere continuă a intensității cîmpului magnetic. Din această curbă se determină variația permeabilității magnetice μ a materialului în funcție de intensitatea cîmpului H (curba punctată din figura 9-3), făcînd raportul dintre inducția B și intensitatea cîmpului magnetic H ($\mu = \frac{B}{H}$).

Ciclul de histerezis (curba M , $+B_r$, $-H_c$, M' , $-B_r$, $+H_c$, M din figura 9-3) este o curbă închisă care reprezintă variația inducției B în funcție de intensitatea cîmpului magnetic H pentru o variație a acestuia de la o valoare $+H_{max}$ la $-H_{max}$ și înapoi la $+H_{max}$. Pentru un material există, o înfinitate de cicluri de histerezis, care depind de valoarea inducției maxime B_{max} de la care se pornește. De aceea ciclul de histerezis se trasează pentru o anumită valoare în prealabil stabilită a inducției maxime (sau cîmpului H_{max}).

Din ciclul de histerezis se deduc valoarea *inducției remanente* B_r (adică inducția în cazul intensității cîmpului egală cu zero), a *forței coercitive* H_c (adică intensitatea cîmpului demagnetizant pentru care inducția este egală cu zero), precum și pierderile magnetice corespunzătoare unei anumite inducții maxime, care sînt proporționale cu suprafața cuprinsă în interiorul ciclului de histerezis.

Curba de magnetizare și ciclul de histerezis se pot trasa experimental atît în curent continuu cît și în curent alternativ. În mod obișnuit trasarea se face în curent continuu folosindu-se metoda balistică, care comportă două variante: metoda inelului sau a torului magnetic și metoda barelor drepte (metoda permeametrelor).

În principiu, ambele variante constau în magnetizarea materialului într-un cîmp magnetic cunoscut, produs de o înfășurare de magnetizare și măsurarea inducției din material, cu ajutorul unei înfășurări de măsurat legată la un galvanometru balistic.

Metoda inelului prezintă avantajul unei măsurări precise, dar are inconvenientul că atît inelul cît și înfășurarea sînt greu de confecționat. Metoda barelor drepte este mai expeditivă, barele confecționîndu-se mai ușor, dar este mai puțin precisă, deoarece intervin scăpări de flux.

1. METODA INELULUI MAGNETIC

La ridicarea curbei de magnetizare și a ciclului de histerezis prin metoda inelului, materialul de încercat are forma unui inel. La încercările de tole, inelul se formează din pachete de tole stanțate care se așază unele peste altele. Pentru ca inducția în inel să se distribuie cît mai uniform pe secțiunea sa

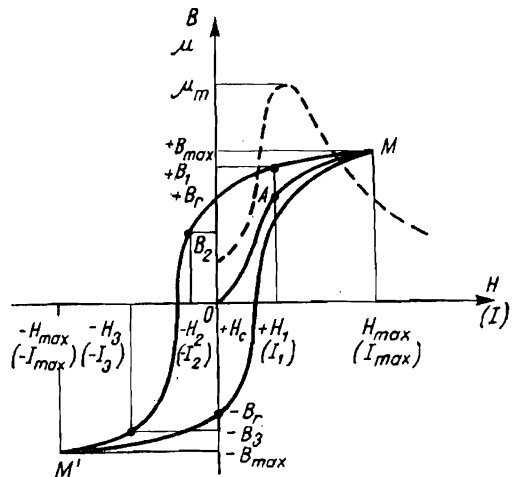


Fig. 9-3. Curba de magnetizare și ciclul de histerezis.

transversală, dimensiunile acestuia se aleg astfel încît circumferințele lui exterioară și interioară să nu difere prea mult față de lungimea mijlocie a drumului liniilor de forță. În general se recomandă ca între lățimea inelului și diametrul său interior să fie raportul $\frac{1}{10} \dots \frac{1}{15}$.

Pe acest inel se distribuie uniform de-a lungul periferiei sale și radial înfășurarea de măsurat cu n_2 spire (fig. 9-4) și deasupra acesteia înfășurarea de magnetizare cu n_1 spire. Înfășurarea de magnetizare este alimentată de la o baterie E de curent continuu (de 20—24 V), curentul I putînd fi reglat cu reostatele R_1 și R_2 și inversat cu ajutorul comutatoarelor K_1 și K_2 . Reostatul R_2 poate fi pus în scurtcircuit cu ajutorul unui întrerupător unipolar K_3 . Înfășurarea de măsurat este legată printr-o rezistență de precizie R_0 la bornele unui galvanometru balistic GB . Pentru determinarea sensibilității balisticului în condițiile măsurării, în paralel cu rezistența R_0 se mai conectează un condensator etalon C_0 și o baterie de acumulate auxiliare E_1 de 12—16 V.

Înainte de începerea măsurărilor, inelul magnetic trebuie demagnetizat. În acest scop, el este supus acțiunii unui cîmp magnetic variabil ca sens, a cărui valoare se micșorează în mod continuu. Pentru aceasta, în înfășurarea de magnetizare se stabilește un curent corespunzător unui cîmp magnetic mai mare decît cel pentru care se va trasa curba de magnetizare, care apoi se micșorează treptat pînă la valoarea zero, inversîndu-l în același timp de mai multe ori cu ajutorul comutatorului K_1 . În felul acesta materialul de încercat este supus la cicluri succesive de histerezis din ce în ce mai mici, pînă la demagnetizarea sa completă.

Pentru ridicarea curbei de magnetizare se dau curentului de magnetizare I valori crescătoare (reglajul se face numai cu reostatul R_1 , reostatul R_2 fiind scurtcircuitat prin închiderea întrerupătorului K_3), corespunzătoare valorilor cîmpului magnetic H pentru care se determină inducția B . Aceste valori ale curentului de magnetizare se calculează în prealabil cu ajutorul relației:

$$H = \frac{n_1 I}{l_m} = \frac{n_1 I}{\pi d_m} \quad [\text{Asp/cm}] \quad (9-15)$$

în care l_m și d_m sînt lungimea medie și diametrul mediu al inelului magnetic.

Pentru determinarea inducției B , pentru fiecare valoare a cîmpului magnetic H se inversează brusc curentul de magnetizare de la $+I$ la $-I$, cu ajutorul comutatorului K_1 (comutatorul K_2 fiind pus pe poziția 2). Prin inversarea curentului se produce în inel o variație a cîmpului magnetic de la $+H$ la $-H$, respectiv o variație a inducției de la $+B$ la $-B$ și deci o variație a fluxului de la $+\Phi$ la $-\Phi$. Această variație de flux $\Delta\Phi = = \Phi - (-\Phi) = 2\Phi$ se măsoară cu ajutorul galvanometrului balistic, fiind proporțională cu deviația maximă α_m a acestuia:

$$\Delta\Phi = \frac{C'_b}{n_2} \alpha_m, \quad (9-16)$$

unde C'_b este constanta balisticului exprimată în unități de flux pe diviziune de scară.

Cum variația de flux este direct proporțională cu variația de inducție $\Delta B = B - (-B) = 2B$ (fiind legată de aceasta din urmă prin relația cunoscută $\Phi = BS$, în care S este secțiunea inelului magnetic) inducția B se determină cu relația:

$$B = \frac{\Delta B}{2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \Phi}{S} = \frac{C'_b}{2n_2 S} \alpha_m. \quad (9-17)$$

Pentru aceasta este necesar însă a se cunoaște valoarea constantei balistice C'_b în condițiile măsurării. Determinarea acesteia se face la începutul măsurării cu ajutorul condensatorului etalon C_0 și al bateriei de acumulatori auxiliară E_1 . În acest scop, condensatorul C_0 se încarcă cu cantitatea de electricitate $Q_0 = C_0 E_1$ (punând comutatorul K_4 pe poziția 1) și apoi se descarcă pe galvanometrul balistic GB șuntat pe rezistența R_0 mutînd comutatorul K_4 pe poziția 2). Galvanometrul balistic va avea o deviație α_0 proporțională cu cantitatea de electricitate care trece prin el $q = Q_0 \frac{R_0}{R_0 + r_2 + R_g}$ (R_g fiind rezistența galvanometrului și r_2 — rezistența înfășurării de măsurat):

$$\alpha_0 = \frac{q}{C_b} = \frac{Q_0}{C_b} \frac{R_0}{R_0 + r_2 + R_g} = \frac{Q_0 R_0}{C_b (R_0 + r_2 + R_g)} = \frac{Q_0 R_0}{C'_b},$$

de unde se deduce constanta balistică:

$$C'_b = \frac{Q_0 R_0}{\alpha_0} = \frac{C_0 E_1 R_0}{\alpha_0}, \quad (9-18)$$

care se introduce în relația de calcul a inducției.

Cu valorile alese pentru cîmpul magnetic H și cele corespunzătoare ale inducției B determinate experimental se trasează curba de magnetizare $B = f(H)$ de la zero pînă la valoarea maximă a cîmpului H pentru care se ridică curba.

Trasarea ciclului de histerzis constă în determinarea valorilor inducției B , corespunzătoare intensităților cîmpului magnetic H care variază de la o valoare $+H_{max}$ la $-H_{max}$ și înapoi la $+H_{max}$, prin măsurarea diferenței dintre inducția B și inducția B_{max} corespunzătoare cîmpului maxim. În acest scop, pentru fiecare valoare a cîmpului magnetic H se produce o variație a curentului de magnetizare de la I_{max} la valoarea corespunzătoare I , provocîndu-se astfel variația cîmpului de la H_{max} la H , respectiv variația inducției de la B_{max} la B care se măsoară cu ajutorul galvanometrului balistic:

$$\Delta B = B_{max} - B = \frac{C'_b}{n_2 S} \alpha_m. \quad (9-19)$$

De fiecare dată, pentru a se putea trece la determinarea valorii următoare a inducției B , după măsurare se variază curentul dela I la $-I_{max}$,

adică inducția de la B la $-B_{max}$ și de la $-I_{max}$ la $+I_{max}$, adică de la $-B_{max}$ la $+B_{max}$. În felul acesta inducția corespunzătoare fiecărui punct de pe ciclul histerezis se determină independent pornind de la valoarea maximă B_{max} și parcurgînd totdeauna ciclul în același sens.

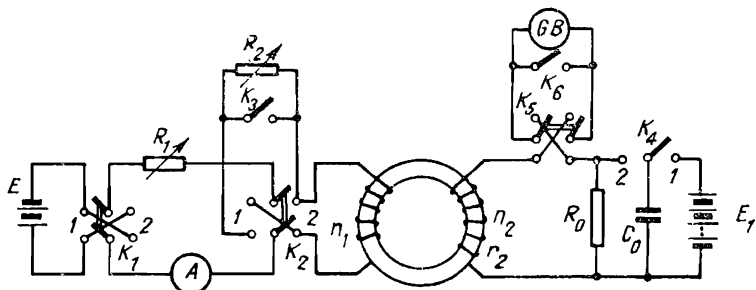


Fig. 9—4. Schema montajului pentru trasarea curbei de magnetizare și a ciclului de histerezis prin metoda inelului magnetic.

Măsurarea se face în două moduri diferite, după cum valorile inducției care se determină corespund intensităților de câmp magnetic pozitive sau negative.

Pentru ridicarea porțiunii de ciclu de la $+B_{max}$ la B , corespunzătoare valorilor pozitive ale câmpului magnetic se procedează în felul următor:

Se stabilește mai întâi valoarea maximă I_{max} a curentului de magnetizare pentru care se face trasarea ciclului. Pentru aceasta se pun comutatoarele K_1 și K_2 pe poziția 1 și cu ajutorul reostatului R_1 se reglează curentul la valoarea I_{max} . În tot restul măsurărilor reostatul R_1 rămîne fixat la această valoare inițială. Se deschide apoi întrerupătorul K_3 introducîndu-se astfel în circuit și reostatul R_2 (pus inițial la valoarea zero), cu care se reglează curentul de magnetizare la o valoare I_1 , ceva mai mică decît I_{max} , pentru care se determină primul punct al ciclului de histerezis. Se mută comutatorul K_2 pe poziția 2 (prin aceasta curentul de magnetizare trece de la valoarea I_1 la $-I_{max}$), se închide întrerupătorul K_3 și apoi se readuce comutatorul K_2 pe poziția 1 (curentul revine astfel de la $-I_{max}$ la valoarea inițială $+I_{max}$). Se deschide brusc întrerupătorul K_3 și se citește deviația maximă α_{m1} a galvanometrului balistic. Prin această operație, variînd curentul de magnetizare de la $+I_{max}$ la I_1 , se produce în inel o variație a câmpului de la H_{max} la H_1 , respectiv o variație a inducției de la B_{max} la B_1 care se măsoară cu ajutorul galvanometrului balistic:

$$\Delta B_1 = B_{max} - B_1 = \frac{C'_b}{n_2 S} \alpha_{m1}. \quad (9-20)$$

În mod analog se procedează la determinarea tuturor punctelor ciclului corespunzătoare valorilor pozitive ale câmpului magnetic.

Pentru determinarea inducției remanente B_r , corespunzătoare curentului zero, variația inducției ΔB_r de la B_{max} la B_r se obține prin deschiderea comutatorului K_2 .

La trasarea porțiunii de ciclu de la B_1 la $-B_{max}$, corespunzătoare valorilor negative ale cîmpului magnetic, pentru realizarea variației inducției de la $+B_{max}$ la o valoare oarecare $-B$, o dată cu variația curentului se face inversarea sensului său. Pentru aceasta se procedează în modul următor:

Avînd comutatorul K_2 deschis se schimbă mai întîi comutatorul K_1 pe poziția 2, pe care va rămîne tot timpul trasării porțiunii de ciclu de la B_1 la $-B_{max}$. Întrerupătorul K_3 fiind închis, se închide comutatorul K_2 pe poziția 1 (prin aceasta curentul de magnetizare trece de la valoarea zero la $-I_{max}$) după care se comută pe poziția 2 (curentul revine astfel la valoarea maximă inițială $+I_{max}$). Avînd reostatul R_2 cu cursorul la poziția de rezistență maximă se deschide întrerupătorul K_3 și apoi se mută comutatorul K_2 pe poziția 1 (curentul de magnetizare căpătînd astfel o valoare negativă foarte mică). Se reglează curentul de magnetizare cu ajutorul reostatului R_2 la valoarea $-I_2$, pentru care se determină primul punct al acestei porțiuni de ciclu histerezis, și apoi se închide întrerupătorul K_3 (prin aceasta curentul de magnetizare trece de la valoarea $-I_2$ la $-I_{max}$). Se mută comutatorul K_2 pe poziția 2 (curentul revenind astfel la valoarea maximă inițială $+I_{max}$) și se deschide întrerupătorul K_3 . Se comută apoi brusc comutatorul K_2 din poziția 2 în poziția 1 și se citește deviația maximă a galvanometrului balistic. Prin această operație o dată cu inversarea curentului de magnetizare are loc și variația intensității sale de la $+I_{max}$ la $-I_2$. Variația inducției de la $+B_{max}$ la B_2 , care se produce prin variația curentului, se determină la fel ca și pentru porțiunea de ciclu corespunzătoare valorilor pozitive ale cîmpului magnetic.

Pentru determinarea punctului următor al ciclului, se revine la valoarea inițială a curentului de magnetizare $+I_{max}$, închizînd mai întîi întrerupătorul K_3 (curentul căpătînd valoarea $-I_{max}$) și apoi mutînd comutatorul K_2 pe poziția 2. Se deschide întrerupătorul K_3 , se mută comutatorul K_2 pe poziția 1 și se reglează cu reostatul R_2 curentul de magnetizare la o nouă valoare $-I_3$. Mai departe se procedează analog cum s-a arătat pentru punctul corespunzător curentului $-I_2$, operațiile repetîndu-se pentru toate celelalte puncte pînă la $-B_{max}$.

2. METODA BARELOR DREPTE (METODA PERMEAMETRELOR)

Metoda inelului permite ridicarea curbei de magnetizare și trasarea ciclului de histerezis cu cea mai mare precizie datorită faptului că circuitul magnetic fiind perfect închis și simetric, cîmpul magnetic obținut în interiorul materialului de încercat este constant pe toată circumferința inelului neexistînd pierderi de flux magnetic. Metoda inelului însă prezintă dezavantaje de ordin practic, din cauza greutății de confecționare a inelului și de execuție a înfășurărilor.

Pentru a se asigura o încercare rapidă și comodă a materialelor feromagnetice, se folosesc aparate speciale numite *permeametre*, care permit

executarea măsurărilor magnetice asupra materialelor sub formă de bare drepte, de secțiune circulară sau dreptunghiulară, care se introduc în bobine de magnetizare confecționate o dată pentru totdeauna. Metoda de măsurare este similară cu cea a inelului.

Metoda barelor drepte prezintă neajunsul că intensitatea cîmpului magnetic nu poate fi calculată exact cu formula $H = \frac{n_1 I}{l}$ ca în cazul metodei inelului, din cauză că într-un solenoid de lungime finită l cîmpul magnetic nu este constant de-a lungul său. De asemenea, extremitățile solenoidului acționînd ca niște poli magnetici exercită un efect de demagnetizare asupra materialului de încercat, care nu poate fi prins în calcul, deoarece variază de-a lungul barei. Pentru ca aceste inconveniente să fie înlăturate și astfel cîmpul magnetic în bară să poată fi calculat suficient de precis cu ajutorul relației $H = \frac{n_1 I}{l}$, permeametrele sînt astfel construite încît să se obțină în bară un cîmp uniform, fără scăpări. Pentru aceasta materialul de încercat se închide cu ajutorul unor juguri de secțiune mult mai mare decît bara, iar scăpările de flux de la extremitățile barei sînt compensate cu ajutorul unor înfășurări suplimentare.

Permeametrele utilizate în practică sînt de tipuri diferite. La unele tipuri măsurarea se face pe o singură bară din materialul de încercat, la altele pe două bare.

Permeametrul cu o singură bară de măsurat este reprezentat în figura 9-5. Aparatul constă dintr-un circuit magnetic închis, compus din jugul

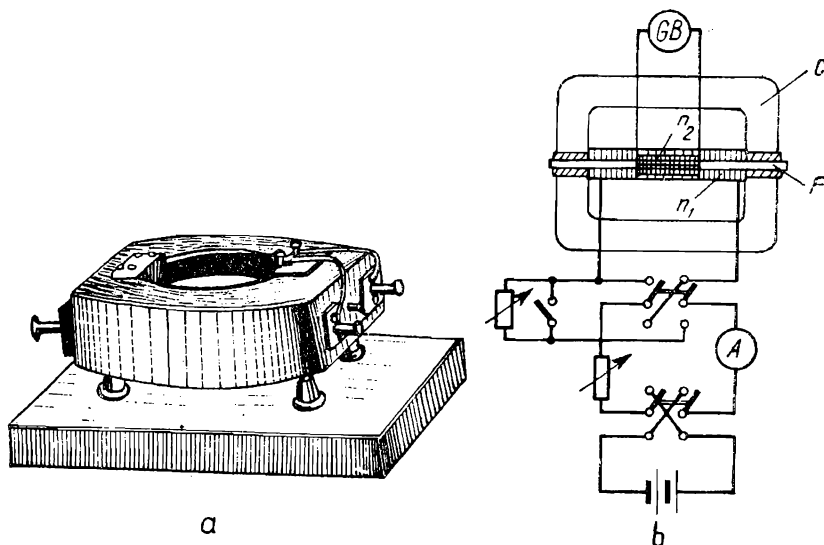


Fig. 9—5. Permeametrul cu o singură bară de măsurat:

a — vedere exterioară; b — schema de măsurare.

masiv C din material feromagnetic de mare permeabilitate și bara de încercat P . Aceasta se introduce printr-un orificiu lateral al jugului în interiorul unei bobine alcătuite din înfășurarea de magnetizare n_1 sub care se găsește înfășurarea de măsurat n_2 . Pentru asigurarea unei magnetizări uniforme a barei de încercat, înfășurarea de magnetizare se realizează astfel încît la capetele bobinei numărul de spire pe unitatea de lungime este mai mare decît la mijloc. Aceasta, deoarece nu întreaga forță magnetomotoare dată de înfășurarea de magnetizare produce magnetizarea barei de încercat, o parte din ea servind la învingerea reluctanței îmbinărilor și jugului, ceea ce în cazul unei distribuții uniforme a spirelor ar duce la un cîmp neuniform în lungul barei de încercat.

Circuitele înfășurărilor de magnetizare și de măsurat sînt identice cu cele de la metoda inelului magnetic.

Ridicarea curbei de magnetizare, și a ciclului de histerezis se face în același mod ca și prin metoda inelului magnetic.

Valorile cîmpului magnetic H pentru care se face ridicarea curbelor se calculează cu relația $H = \frac{n_1 I}{l}$. Deosebirea dintre valorile calculate și cele reale nu depind însă numai de construcția permeometrului, ci și de raportul în care se află permeabilitățile jugului și ale barei de încercat. La încercarea materialelor feromagnetice cu permeabilitate magnetică mică (fontă, oțel maleabil), valorile calculate sînt apropiate de cele reale. La încercarea materialelor cu permeabilitate mare diferența este mai mare. De aceea pentru mărirea preciziei măsurărilor se introduc corecții suplimentare sau, în loc să se calculeze, intensitatea cîmpului magnetic se măsoară.

Corecțiile suplimentare sînt indicate sub forma unor curbe de corecție, numite curbe de decalaj. Aceste curbe se primesc o dată cu permeometrul sau se determină cu ajutorul unei *bare etalon* ale cărei curbe de magnetizare reale sînt cunoscute (fiind ridicate prin alte metode mai precise). Diferența dintre curbele reale și curbele ridicate cu permeometrul luată cu semn contrar reprezintă corecțiile ΔH corespunzătoare diferitelor inducții B .

Pentru măsurarea cîmpului magnetic, sub înfășurarea de magnetizare pe bara de încercat se așază bobina de măsurat intensitatea cîmpului. În acest caz, conectînd alternativ galvanometrul balistic, la înfășurarea de măsurat n_1 sau la bobina de măsurat a cîmpului, la comutările corespunzătoare ale curentului de magnetizare, deviațiile galvanometrului balistic se obțin proporționale cu variația inducției sau cu variația cîmpului de magnetizare.

Pentru ușurarea determinărilor, galvanometrul balistic se etalonează în prealabil în condițiile măsurării astfel încît constanta sa să aibă valoarea 100, adică inducția să se calculeze cu relația:

$$B = 100 \alpha_m,$$

unde α_m este deviația galvanometrului balistic. Aceasta se realizează cu ajutorul unei bare etalon, a cărei curbă de magnetizare este cunoscută. Alegînd inducția B_{100} care corespunde unui cîmp $H_{100} = 100 \text{ Asp/cm}$, se stabilește în circuitul de magnetizare un curent $I_{100} = \frac{H_{100}}{n_1 l} = \frac{100}{n_1 l}$. Se inversează acest curent și se reglează rezistențele din circuitul de măsurat pînă cînd deviația galvanometrului balistic este de 100 de ori mai mică decît valoarea inducției B_{100} ($B = 100 \alpha_m$).

C. DETERMINAREA PIERDERILOR MAGNETICE

În curent alternativ, datorită remagnetizării periodice, în materialele feromagnetice, au loc pierderi magnetice prin fenomenul histerezis și prin curenții turbionari. Aceste pierderi, raportate la unitatea de masă a materialului, depind de frecvența curentului alternativ, de inducția maximă, de proprietățile magnetice ale materialului, precum și de dimensiunile acestuia.

Determinarea separată a pierderilor prin fenomenul histerezis și a celor prin curenții turbionari nu este posibilă. În practică se determină pierderile totale pe cale experimentală și apoi se separă cele două componente.

Pierderile magnetice se măsoară de obicei prin metoda wattmetrului.

Metoda wattmetrului. Principiul metodei wattmetrului constă în aceea că puterea măsurată de un wattmetru conectat în circuitul unei bobine cu miez din material feromagnetic se compune din puterea pierderilor magnetice și puterea consumată în înfășurarea de magnetizare și în aparatele de măsurat. Cunoscînd parametrii bobinei și ai aparatelor de măsurat, puterea consumată în acestea se calculează ușor și astfel se află imediat pierderile prin fenomenul histerezis și prin curenții turbionari.

Pentru încercare se utilizează de obicei *aparatură Epstein*. Acesta constă din patru bobine de magnetizare identice alcătuite din una sau două înfășurări așezate după laturile unui pătrat. În general se folosește aparatul Epstein cu bobine cu două înfășurări, deoarece la acesta în indicația wattmetrului nu intră puterea consumată în înfășurarea de magnetizare. În interiorul bobinelor se introduc pachetele de tole de încercat. Cele patru pachete sînt de greutate egală (2,5 sau 1,5 kg fiecare). Pentru a afla valoarea medie a pierderilor, jumătate din tole sînt tăiate din table în sensul de laminare, iar cealaltă jumătate, perpendicular pe sensul de laminare. Pachetele de tole se strîng cu niște cleme speciale formînd un circuit magnetic închis. În felul acesta, aparatul *Epstein* constituie de fapt un transformator.

Schema de conectare a aparatului Epstein este arătată în figura 9-6. Circuitul de curent al wattmetrului este legat în serie cu înfășurarea de magnetizare n_1 a bobinelor aparatului Epstein AE , fiind astfel străbătut de curentul de magnetizare I_1 , iar circuitul de tensiune, ca și voltmetrul V , este

legat la bornele înfășurării secundare n_2 a bobinelor, aplicîndu-li-se astfel tensiunea secundară U_2 . Ca urmare, indicația wattmetrului este:

$$P_w = U_2 I_1 \cos(\widehat{U_2 I_1}) = \bar{U}_2 \bar{I}_1, \quad (9-21)$$

unde $\widehat{U_2 I_1}$ este unghiul de defazaj dintre curentul I_1 din înfășurarea primară și tensiunea U_2 la bornele înfășurării secundare. Se demonstrează că puterea indicată de wattmetru este:

$$P_w = -\frac{n_2}{n_1} \left[P_{Fe} + \frac{U_2^2}{r_w} = \frac{U_2^2}{r_v} \right]. \quad (9-22)$$

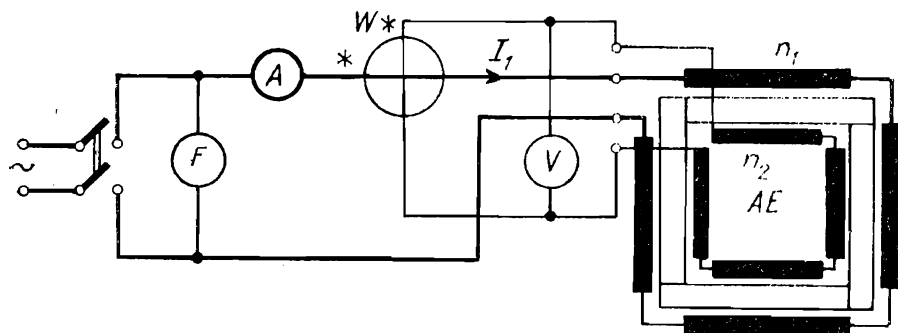


Fig. 9—6. Schema de măsurare a pierderilor în fier prin metoda wattmetrului.

Deci indicația wattmetrului este proporțională cu suma pierderilor magnetice P_{Fe} și în aparatele de măsurat din circuitul secundar, adică puterea consumată în circuitul de tensiune al wattmetrului $\left(\frac{U_2^2}{r_w}\right)$ și în voltmetru $\left(\frac{U_2^2}{r_v}\right)$, puterea consumată în înfășurarea secundară fiind neglijabilă. Semnul minus arată că deviația wattmetrului este în sens contrar celui normal și, ca urmare, legăturile la una din bobinele lui trebuie să fie făcută invers.

Din indicațiile wattmetrului se obțin pierderile prin fenomenul histerezis și prin curenții turbionari cu relația:

$$P_{Fe} = \frac{n_1}{n_2} P_w - \frac{U_2^2}{r_w} - \frac{U_2^2}{r_v}. \quad (9-23)$$

Pentru măsurarea puterii P_w se folosește un wattmetru special, destinat să funcționeze în circuit cu factor de putere mic ($\cos \varphi = 0,2$), deoarece unghiul de defazaj dintre tensiunea U_2 și curentul I_1 este mare.

Pierderile magnetice se determină pentru diferite valori ale inducției maxime în tole. Reglajul inducției la valoarea B_m pentru care se măsoară

pierderile se face prin variația curentului I_1 din înfășurările primare pînă cînd voltmetrul indică o tensiune la bornele înfășurării secundare egală cu:

$$U_2 \cong E_2 = 4k_f f n_1 S B_m 10^{-8} \text{ (V)}, \quad (9-24)$$

în care: k_f este factorul de formă al curbei de tensiune;

f — frecvența;

n_1 — numărul de spire al înfășurării primare;

S — secțiunea probei, în m^2 .

Curentul I_1 nu se reglează cu ajutorul reostatelor în circuitul primar al aparatelor deoarece acesta deformează curba de tensiune. De aceea aparatul se alimentează de obicei de la un generator, a cărui tensiune se reglează prin variația excitației sale.

Prin metoda wattmetrului se pot determina pierderile magnetice pentru inducții cuprinse între 0,1 și 1,5—1,6 Wb/m^2 .

Capitolul X

INTRODUCERE ÎN TEHNICA MĂSURĂRII MĂRIMILOR NEELECTRICE

A. GENERALITĂȚI

Procesele tehnologice industriale se caracterizează printr-un mare număr de parametri: temperaturi, presiuni, debite nivele etc. Cunoașterea modului de desfășurare a unui proces tehnologic necesită obținerea rapidă de informații privind valoarea fiecărui parametru. Informația obținută este utilizată, de exemplu, pentru menținerea parametrilor în anumite limite. În unele cazuri, informația privind condițiile de desfășurare a unui proces tehnologic este convertită, adică transformată în valori numerice, care sînt prelucrate de către mașini de calcul simple sau universale. Cu ajutorul unei mașini de calcul, cunoscînd valorile parametrilor care caracterizează un proces, se poate determina modul în care trebuie să se desfășoare procesul tehnologic, pentru ca produsul să fie de o anumită calitate sau pentru ca prețul de cost să fie redus. Prin urmare, măsurarea mărimilor neelectrice are un rol important atît în dirijarea de către om a unui proces tehnologic, cît și în cele mai perfecționate sisteme automate ce conțin calculatoare electronice.

Dispozitivele care servesc la convertirea (transformarea) unei mărimi de o anumită natură fizică într-o mărime de altă natură fizică, sau într-o mărime de aceeași natură fizică, însă care variază în altă gamă de valori, se numesc *traductoare*. De obicei, un traductor convertește o mărime neelectrică (care trebuie să fie măsurată) într-o mărime electrică. De exemplu, termocuplul convertește temperatura în tensiune electromotoare. Sînt însă și cazuri cînd un traductor convertește o mărime neelectrică tot într-o mărime neelectrică (de exemplu, tubul Bourdon convertește presiunea într-o deviație unghiulară).

În acest scop, traductoarele trebuie să conțină un element sensibil la variația unui anumit parametru. Astfel, un traductor de temperatură trebuie să conțină un element sensibil la variația temperaturii. Deci este necesar ca elementul sensibil al unui traductor să aibă o proprietate fizică care depinde de mărimea măsurată în mod liniar și într-un interval mare.

De multe ori, informația căutată se referă la mărimi implicând o energie care se dezvoltă sau acționează în fenomenul studiat, de exemplu: *energie mecanică* (forță, presiune, deformare, deplasare, debit, viteză, accelerație); *energie chimică* (potențial electrochimic); *energie termică* (temperatură, flux de căldură); *energie radiantă* (intensitate de radiație, distribuție spectrală a radiației); *energie electrică* (tensiune, curent, câmp electric, câmp magnetic etc). În aceste cazuri, semnalul electric se poate obține prin simplă conversiune, cu ajutorul traductorului, a mărimii neelectrice respective în mărime electrică.

Alteori, informația se referă la proprietăți ale unor materiale sau produse (de exemplu, analiza compoziției, detectarea unor defecte de structură, stabilirea dimensiunilor etc.). În asemenea cazuri, prin intermediul traductorului se introduce din exterior în obiectul studiat o energie sau un semnal de activare și se detectează efectele interacțiunii energiei, respectiv semnalului de activare, introduse din exterior cu obiectul cercetat. În această situație, traductorul este fie alimentat cu energie sau semnale de activare, fie include o sursă de energie sau un generator de semnale de activare.

Traductoarele utilizate pentru a indica valoarea unui parametru sînt în general conectate la aparate de măsurat gradate în unitățile respective de măsură. De exemplu, pentru a măsura valoarea temperaturii într-un cuptor cu ajutorul unui termocuplu, este necesar un milivoltmetru gradat în $^{\circ}\text{C}$. Sînt însă și traductoare care pot acționa direct asupra unui ac indicator. De exemplu, la măsurarea temperaturii cu traductoare bimetalice acul indicator poate fi acționat direct de capătul liber al lamei bimetalice.

Traductoarele utilizate în sistemele automate simple (de stabilizare a valorii unui parametru) sau în sistemele automate complexe ce conțin calculatoare electronice sînt conectate la dipozitive numite *adaptatoare*. Rolul unui adaptor este de a transforma mărimea de ieșire a traductorului într-o altă mărime standardizată, care este utilizată în transmiterea informației între blocurile sistemului automat.

Deci, măsurarea diferiților parametri este o operație fără de care controlul desfășurării unui proces tehnologic și cu atît mai mult automatizarea sa complexă nu sînt posibile. Diversitatea aparatelor de măsurare și control utilizate astăzi în industrie este extremă. Cu toate acestea, se poate contura o structură generală comună celor mai multe din aceste aparate. Sub o formă simplificată, această structură generală este reprezentată în figura 10—1.

B. CLASIFICAREA TRADUCTOARELOR

În practica măsurilor industriale există o mare varietate de tipuri de traductoare, care se pot clasifica în mai multe moduri:

— După mărimea pe care o transformă, traductoarele se clasifică în: *traductoare de temperatură*, *traductoare de presiune*, *traductoare de nivel* etc.

— După principiul de funcționare, traductoarele se pot clasifica în: *traductoare generatoare* și *traductoare parametrice*.

Un *traductor generator* la variația mărimii măsurate transmite la ieșire o anumită energie. De exemplu, termocuplul este un traductor generator, deoarece la variația mărimii măsurate, adică a temperaturii, transmite la ieșire o tensiune electromotoare.

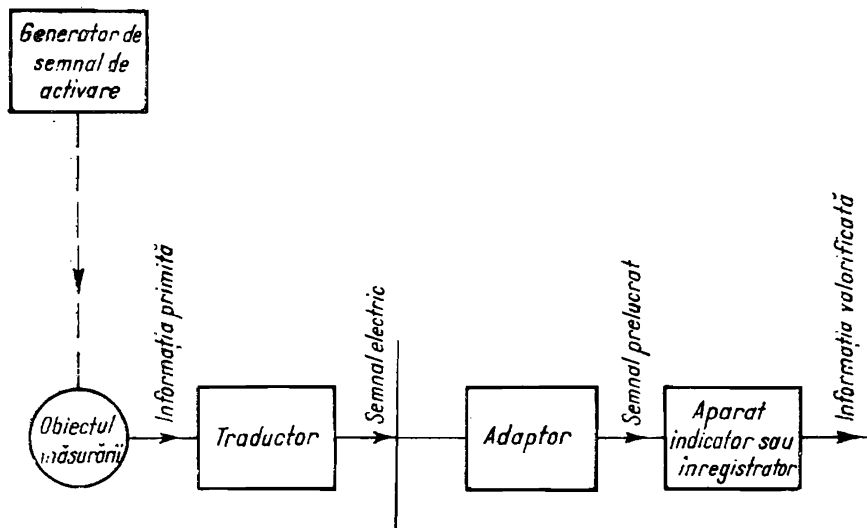


Fig. 10—1. Structura generală a unui aparat de măsurare și control.

Un *traductor parametric* la variația mărimii măsurate transmite la ieșire o variație a unui parametru propriu traductorului respectiv (de exemplu, termorezistența este un traductor parametric, deoarece la variația mărimii măsurate, adică a temperaturii, transmite la ieșire o variație a unei rezistențe electrice). Prin urmare, deosebirea între un traductor parametric și un traductor generator constă în natura diferită a semnalelor transmise la ieșire. Astfel, din categoria traductoarelor parametrice fac parte, de exemplu, traductoarele bazate pe variația unui parametru al circuitului electric. În funcție de variația parametrului respectiv, traductoarele parametrice se clasifică, la rândul lor, în *traductoare inductive, rezistive, capacitive*.

— **Din punctul de vedere al mărimii de ieșire**, traductoarele pot fi *analogice* și *numerice*; cele analogice furnizează la ieșire un semnal continuu variabil cu mărimea măsurată, iar cele numerice furnizează un semnal discontinuu, o succesiune de impulsuri sau o combinație de tensiuni, care după un anumit cod reprezintă valoarea numerică (discretă) a mărimii măsurate.

C. CONDIȚII IMPUSE TRADUCTOARELOR

Traductoarele folosite în tehnica măsurărilor trebuie să îndeplinească următoarele condiții principale:

— Mărimea transmisă la ieșirea traductorului trebuie să depindă în mod liniar de mărimea măsurată într-un interval de valori cât mai mare. Dependen-

ța între mărimea de ieșire și mărimea de intrare a unui traductor în regim staționar se numește *caracteristică statică*. Mărimea de ieșire a traductorului nu trebuie să fie influențată de *perturbații*. Când perturbațiile influențează mărimea de ieșire a traductorului trebuie luate măsuri pentru a compensa efectul acestora. De exemplu, la măsurarea temperaturii într-un cuptor cu ajutorul unui termocuplu variația temperaturii mediului exterior influențează asupra tensiunii electromotoare de la bornele termocuplului. Pentru compensarea acestei influențe se folosesc metode speciale, care vor fi studiate în capitolul care se referă la principiul de funcționare al termocuplurilor. De asemenea, problema compensării perturbațiilor va fi studiată și la alte tipuri de traductoare.

— Precizia de măsurare a traductorului trebuie să fie cât mai mare. Ea se apreciază prin *clasa de precizie* a traductorului, care este raportul dintre eroarea absolută maximă și gama de lucru a elementului dat.

— Sensibilitatea unui traductor trebuie să fie cât mai mare. De exemplu, un termocuplu este cu atât mai sensibil, cu cât la aceeași variație a temperaturii transmite la ieșire o variație mai mare a tensiunii electromotoare.

— Un traductor nu trebuie să influențeze asupra mărimii măsurate. De exemplu, termocuplul nu trebuie să influențeze asupra cîmpului de temperatură unde se efectuează măsurarea. Această condiție determină alegerea construcției și a modului de montare a traductoarelor.

— Un traductor trebuie să sesizeze orice fel de variații ale mărimii măsurate, indiferent dacă acestea sînt lente sau rapide.

Această condiție determină criteriul de alegere a construcției traductoarelor pentru măsurarea aceleiași mărimi. De exemplu, la măsurarea temperaturii unui proces termic cu o variație rapidă în timp trebuie să se aleagă un traductor cu o inerție termică cât mai mică. Inerția unui traductor se definește prin *caracteristica dinamică*, care reprezintă dependența între mărimea de ieșire și mărimea de intrare a traductorului în regim dinamic. Prin regim dinamic se înțelege starea de funcționare în care mărimea de intrare și prin urmare și mărimea de ieșire variază în timp*.

— Un traductor trebuie să transmită la ieșire un semnal de o putere suficientă, pentru a acționa asupra unui aparat indicator sau asupra unui element de adaptare utilizat într-un sistem automat.

— Se recomandă ca un traductor să aibă la ieșire un semnal care să poată fi transmis la distanță, ceea ce este necesar în cazul instalațiilor moderne de automatizare. Dacă nu este posibil să se adopte un principiu de funcționare corespunzător acestei condiții, atunci mărimea de ieșire a traductorului (o deviație unghiulară, o deplasare liniară) se convertește într-o mărime electrică cu ajutorul unui element separat. De exemplu, în cazul măsurării debitului cu ajutorul rotametrului (v. fig. 12—18) poziția pe verticală a flotorului poate fi convertită într-un semnal electric, cu ajutorul unui traductor electric de ieșire (inductiv).

* Pentru a studia variația mărimii de ieșire a unui traductor în regim dinamic, se obișnuiește să se aplice la intrarea sa un semnal treaptă.

În afara acestor condiții principale pe care trebuie să le îndeplinească un traductor, în practică se mai au în vedere și alte calități, ca: stabilitatea în timp a caracteristicilor, reproductibilitatea caracteristicilor, simplitatea instalării și exploatării, rezistența mecanică mare, preț de cost redus etc.

După alegerea tipului de traductor pentru măsurarea unui parametru (temperatură, debit, nivel etc.) este necesară efectuarea unor operații de verificare. Datorită diversității tipurilor de traductoare nu există instrucțiuni generale de verificare. În general, prin verificarea unui traductor se înțelege controlul funcționării și al indicațiilor sale.

D. ADAPTOARE

După cum s-a menționat mai sus, un traductor trebuie să îndeplinească anumite condiții tehnice. O parte din aceste condiții se referă la mărimea de ieșire a traductorului.

Pentru a putea fi utilizată în continuare într-un anumit scop, mărimea de ieșire a traductorului trebuie, să aibă o anumită putere, natură fizică, formă (analogică sau discretă) etc. În ultimul timp, o dată cu introducerea calculatoarelor electronice în automatizarea proceselor industriale, forma analogică de prezentare a diverselor mărimi nu mai este posibilă, din care cauză mărimile se convertesc sub formă discretă (numerică).

Pentru a prelucra informația obținută sub formă de semnal de la traductor, între traductor și aparatul indicator sau un alt element dintr-un sistem automat, se intercalează un element adaptor. În general, un element adaptor poate fi un circuit de măsurare, un amplificator, un modulator sau demodulator, un convertor analogic-numeric etc. (cu ajutorul circuitului de măsurare se pune în evidență variația semnalului și, dacă este necesar, această variație se transformă în tensiune electrică; cu ajutorul amplificatorului se ridică nivelul de putere al semnalului; cu ajutorul modulatorului și demodulatorului se modifică legea variației sale în timp; cu ajutorul convertorului analogic-numeric se transformă semnalul analogic în semnal numeric etc.).

Pentru recuperarea sau valorificarea informației conținute de semnal, sub forma indicării vizibile, a înregistrării, a semnalizării, a utilizării pentru reglare automată, pentru calcule complexe etc., se folosesc diferite aparate indicatoare și înregistratoare (analogice sau numerice), dispozitive de memorizare etc.

În unele situații recuperarea informației trebuie efectuată la mare distanță față de locul în care a fost obținută, adică trebuie efectuată *telemăsurarea*. În sistemele de telemăsurare, lanțul de prelucrare a informației include o serie de elemente specifice pentru transmiterea la distanță a semnalelor: traductoare, circuite de măsurare, modulatori și demodulatori speciale de telemăsurare, canale de telecomunicații (cu fir sau fără fir) etc.

În automatizările industriale este necesară instalarea unui număr mare de traductoare pentru cele mai diferite mărimi. Din această cauză, în practică se întâlnesc adaptoare care diferă, în primul rând, după operația

de convertire efectuată. Astfel, există adaptoare care convertesc o tensiune continuă în curent continuu, o tensiune alternativă în curent continuu, o deplasare în curent continuu etc. Mărimea în care se convertesc alte mărimi depinde de sistemul unificat din care face parte adaptorul respectiv.

E. TENDINȚE MODERNE ÎN CONSTRUCȚIA APARATELOR DE MĂSURARE, CONTROL ȘI AUTOMATIZARE

Numărul mare al mărimilor de măsurat, de natură fizică adesea diferită, varietatea tipurilor de traductoare care pot fi folosite pentru măsurarea acestor mărimi în game de valori și condiții de măsurare uneori particulare pentru fiecare din ele, precizia tot mai mare cerută în măsurare impun următoarele condiții în construcția aparatelor de măsurare, control și automatizare.

a. **Realizarea de sisteme de măsurare și reglare automată unificate, construite din elemente pe cât posibil tipizate și prelucrind semnale unificate.** Parametrii care caracterizează orice element sau aparat al sistemului unificat de măsurare sau reglare sînt semnalele de intrare și ieșire. Aceste semnale se standardizează pentru întreaga serie de elemente, creîndu-se astfel posibilitatea construcției complexului din blocuri interschimbabile.

Tendința modernă pentru sistemele unificate electronice este de a folosi curentul continuu drept semnal unificat. Valorile tipice utilizate sînt: 0,5—5 mA; 2—10 mA; 10—50 mA etc. În alte sisteme, semnalul unificat este o tensiune continuă sau alternativă.

În construcția sistemului de reglare unificat electronic, în Republica Socialistă România s-a ales ca semnal unificat curentul continuu, variînd între 2 și 10 mA.

Avantajele utilizării sistemelor de măsurare și reglare unificate sînt următoarele:

- reducerea diversității elementelor necesare permite fabricarea lor în serii mari, deci ieftin;
- exploatarea și întreținerea aparaturii se poate organiza mai ușor și mai economic;
- prin asamblarea diferită a elementelor tipizate prefabricate se pot imediat realiza instalațiile necesare pentru măsurarea și reglarea celor mai variate mărimi.

b. **Realizarea de aparate de măsurare și control numerice.** Aceste aparate au față ce cele analogice, următoarele avantaje:

- asigură o precizie mult mai înaltă în obținerea și mai ales în prelucrarea informației;
- mențin această precizie înaltă în toate etapele transmiterii la distanță, indicării și înregistrării informației, datorită insensibilității la perturbații a semnalului numeric.

Aparatele de măsurare numerice sînt însă mult mai scumpe decît cele analogice și utilizarea lor nu se justifică decît atunci cînd avantajele pe care

le prezintă sînt valorificate. Utilizarea lor în măsurarea și controlul industrial este încă restrînsă.

c. **Realizarea de instalații de control centralizat pentru măsurarea și controlul centralizat al instalațiilor complexe.** În asemenea instalații de control centralizat se face prelucrarea și recuperarea automată, de obicei sub formă numerică, a informației obținute de la zeci sau sute de puncte de măsurare diferite. De cele mai multe ori se efectuează concomitent și operația numită „reducerea datelor“, care constă în selectarea și semnalizarea informațiilor importante, prelucrarea și interpretarea lor prin calcule etc.

d. **Realizarea de aparate electronice de măsurare și control sigure în funcționare, robuste și cît mai puțin voluminoase, adică miniaturizate.** În această direcție, o primă etapă o constituie trecerea de la tuburile electronice la dispozitivele semiconductoare. O a doua etapă o constituie trecerea de la tehnica circuitelor electronice cu piese distincte la tehnica circuitelor electronice integrate, care reunesc într-o singură structură semiconductoare zeci sau sute de dispozitive electronice active și elemente pasive de circuit. Circuitele integrate aduc o creștere a siguranței de funcționare a aparaturii electronice, o reducere a volumului și greutateii și o scădere apreciabilă a prețului de cost, în special pentru aparatele utilizînd circuite unificate, realizabile în serii suficient de mari.

Capitolul XI

MĂSURAREA TEMPERATURII

A. GENERALITĂȚI

În stadiul actual al tehnicii, măsurarea temperaturii constituie o problemă importantă în toate ramurile industriale. Necesitatea de a măsura temperaturi înalte, de a mări precizia de măsurare și de a transmite la distanță indicațiile respective a dus la elaborarea de noi metode de măsurat.

Temperatura este o mărime care caracterizează gradul de încălzire al corpurilor. Unitatea de măsură a temperaturii are un caracter convențional, deoarece măsurările se raportează la o valoare convențională ce se reproduce cu mare exactitate.

Pentru a ușura transmiterea unității de temperatură s-a constituit Scara internațională practică de temperatură, care se compune dintr-o serie de puncte fixe de reper. Aceste puncte reprezintă temperaturi reproductibile (puncte fixe prin definiție), cărora li s-au atribuit valori numerice. Pentru temperaturi intermediare s-au stabilit formule de interpolare, care vor fi prezentate o dată cu descrierea traductoarelor respective de măsurat. Astfel, punctul de topire al gheții, adică temperatura de echilibru între gheață și apă pură reprezintă un punct fix fundamental cu valoarea numerică $0,00^{\circ}\text{C}$. Temperatura de echilibru între apă și vaporii săi la presiunea atmosferică normală reprezintă temperatura de fierbere a apei, având valoarea de 100°C . Temperatura măsurată după Scara internațională se notează cu litera t , iar valorile numerice sînt însoțite de semnul $^{\circ}\text{C}$ (grad Celsius). Temperatura măsurată în raport cu originea la *zero absolut* se notează cu litera T , iar valorile numerice sînt însoțite de semnul $^{\circ}\text{K}$ (grad Kelvin). Între temperaturile T și t există următoarea relație:

$$T = t + 273,16 \quad (11-1)$$

Măsurarea temperaturii unui corp se bazează pe fenomenul de schimb de căldură între corpuri cu grade diferite de încălzire și pe variația cu temperatura a proprietăților fizice ale unor materiale. Tehnica măsurării indus-

triale a temperaturii se bazează pe variația următoarelor proprietăți fizice ale materialelor în funcție de temperatură:

- variația dimensiunilor liniare ale unor corpuri solide cu temperatura constituie principiul de funcționare al termometrelor cu tub și tijă, precum și cu lamă bimetalică;

- variația volumului unor lichide în tuburi capilare cu temperatura constituie principiul de funcționare al termometrelor cu lichide;

- variația presiunii unor lichide, gaze și vapori în volum închis cu temperatura constituie principiul de funcționare al termometrelor manometrice;

- variația rezistenței electrice a unor conductoare (termorezistențe) și semiconductoare (termistoare) cu temperatura se folosește în construcția traductoarelor termorezistive;

- apariția unei tensiuni termoelectromotoare la capetele libere a două conductoare diferite și sudate între ele, când unul dintre cele două puncte de sudură este încălzit la temperatura măsurată, iar celălalt punct de sudură este menținut la o temperatură cunoscută și constantă, este utilizată în construcția traductoarelor termoelectrice (termocupluri);

- acțiunea termică și distribuția spectrală a energiei radiate de un corp încălzit stă la baza funcționării pirometrelor de radiație.

Domeniul de utilizare al fiecărui tip de traductor de temperatură depinde de: intervalul în care are loc o variație liniară a proprietății fizice respective, în raport cu temperatura și cu construcția adoptată (materiale de izolație, conductoare etc.).

B. TRADUCTOARE BAZATE PE DILATAREA TERMICĂ A CORPURILOR SOLIDE

Funcționarea acestor traductoare se bazează pe variația dimensiunilor liniare ale corpurilor solide în funcție de variația temperaturii. Într-un interval mic de temperatură lungimea unor tuburi, tije sau lamele metalice depinde aproximativ liniar de temperatură. Legătura între alungirea Δl a unui material, coeficientul de dilatare liniară α , și creșterea temperaturii $\Delta \theta$ este definită prin relația:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta \theta \quad (11-2)$$

Prin urmare, aceste traductoare convertesc temperatura într-o deplasare care poate fi transmisă la un ac indicator sau la un adaptor pentru obținerea unui semnal electric. Când deplasarea se transmite la un ac indicator se obține un termometru. Termometrele bazate pe acest principiu sînt de două tipuri constructive: cu tub și tijă și cu lamă bimetalică.

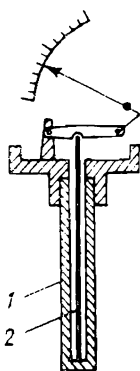


Fig. 11—1. Termometru cu tub și tijă.

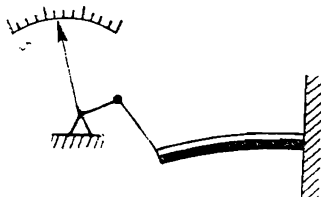


Fig. 11—2. Schema simplificată a unui termometru bimetalic.

În figura 11—1 este reprezentat un termometru cu tub și tijă. Tubul 1 este confecționat dintr-un material cu un coeficient de dilatare liniară mare: alamă, bronz, Al, Cu, Ni, Cr-Ni etc. Tijă 2 este confecționată dintr-un material cu un coeficient de dilatare foarte mic: porțelan, cuarț sau invar (64% Fe și 36% Ni). La creșterea temperaturii tubul se dilată mai mult decât tijă, iar capătul liber al acesteia se deplasează în jos. Această deplasare depinde de temperatură și este transmisă acului indicator prin intermediul unui mecanism de pârghii. De obicei, pentru transmiterea deplasării se utilizează roți dințate, sectoare dințate și cremaliere. Mecanismul de transmitere a deplasării are rolul de a amplifica deplasarea și de a o transmite acului indicator.

Așa cum se arată în mod simplificat în figura 11—2, termometrele bimetalice sînt formate dintr-o lamă bimetalică (formată din două lame sudate pe toată lungimea lor) și un mecanism de transmitere a deplasării la acul indicator. Ca și la termometrele cu tub și tijă, cele două materiale din care se confecționează lamele trebuie să aibă coeficienți de dilatare liniară foarte diferiți. Sudarea celor două lame este executată pe toată suprafața lor. Când temperatura crește, lama care are un coeficient de dilatare mare se dilată mai mult și lama bimetalică se îndoaie în partea lamei cu un coeficient de dilatare redus. Deplasarea capătului liber al lamei bimetalice poate fi transmisă la acul indicator direct sau prin intermediul unui mecanism special de transmitere. La termometrele bimetalice, în funcție de sensibilitatea dorită lama poate fi și de formă spirală sau elicoidală. Grosimea lamei bimetalice este cuprinsă în general între 0,05 și 2 mm, iar lungimea ei se alege în funcție de deplasarea care trebuie să fie transmisă acului indicator.

Cu aceste traductoare se pot măsura temperaturi cuprinse între -50°C și $+500^{\circ}\text{C}$; aceste limite de măsurare depind de stabilitatea chimică a metalelor din care sînt confecționate traductoarele.

C. TRADUCTOARE BAZATE PE DILATAREA TERMICĂ A GAZELOR ȘI LICHIDELOR

Cele mai răspândite traductoare de acest tip sînt formate dintr-un sistem închis umplut cu lichid, gaz sau vapori, din care cauză sînt numite și traductoare manometrice. Aceste traductoare convertesc temperatura într-o depla-

sare care poate fi transmisă la un adaptor sau la un ac indicator. În ultimul caz se obține un termometru manometric.

Așa cum se vede în figura 11—3, termometrul manometric este format dintr-un balon 1 (sondă) umplut cu lichid sau cu gaz și unit printr-un tub capilar 2 cu un tub elastic 3. Tubul elastic este curbat și are o secțiune ovală sau elipsoidală. Capătul liber al tubului elastic este legat prin intermediul unor articulații sau angrenaje de acul indicator. La încălzirea balonului umplut, de exemplu cu azot, presiunea din sistemul închis crește și capătul liber al tubului elastic se va deplasa. Această deplasare este transmisă acului indicator; prin urmare aparatul poate fi gradat în $^{\circ}\text{C}$. Principalele avantaje ale termometrelor manometrice sînt: sensibilitatea lor ridicată (aceasta se explică prin faptul că presiunea din sistemul închis crește mult cu temperatura), simplitatea construcției, rezistența la trepidații și siguranță împotriva exploziilor. Dezavantajele termometrelor manometrice sînt: variațiile temperaturii mediului exterior influențează asupra tubului capilar, sînt necesare verificări frecvente ale funcționării, iar reparațiile în cazul ruperii tubului capilar sînt dificile.

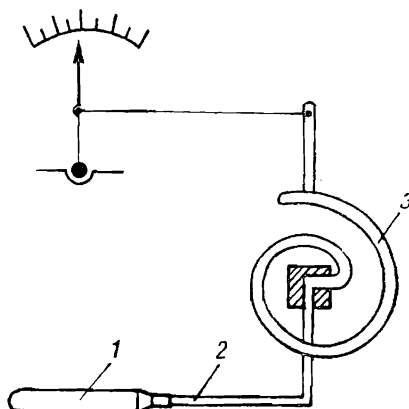


Fig. 11—3. Termometru manometric

Precizia termometrelor manometrice este în general mică, ajungînd pînă la clasa de precizie 2,5. Termometrele manometrice cu substanțe lichide organice (xilen, alcool, hexan) se utilizează pentru intervalul de temperatură de la -80°C pînă la 320°C , iar cele cu vapori saturați ai unui lichid cu punct de fierbere scăzut (clorură de metil, butan, eter etilic etc.), pentru intervalul de temperatură de la 0°C pînă la 250°C . Termometrele manometrice umplute cu gaze (azot, argon etc.) se folosesc în limite mai largi de temperatură, de la -200°C pînă la $+600^{\circ}\text{C}$. Deoarece tubul elastic înmagazinează suficientă energie la variația presiunii datorită modificării temperaturii, deplasarea acestuia poate fi utilizată și pentru deplasarea unei penițe (cu cerneală specială) pe o diagramă.

Termometrele manometrice semnalizatoare au o construcție asemănătoare. La o anumită deviere a acului, deci la o anumită temperatură, se pune în mișcare un mecanism care închide sau deschide un contact dintr-un circuit electric. În general, contactul se realizează cu ajutorul unor întrerupătoare de mercur. Semnalizarea depășirii unor limite fixate de operator poate fi utilizată și pentru reglarea temperaturii în limitele respective.

D. TRADUCTOARE TERMoeLECTRICE (TERMOCUPLURI)

1. GENERALITĂȚI

Termocuplul este folosit pe scară largă la măsurarea temperaturilor cuprinse între -100°C și $+1300^{\circ}\text{C}$. În unele cazuri, termocuplul poate fi utilizat atît pentru temperaturi mai mari (pînă la $+2000^{\circ}\text{C}$), cît și pentru temperaturi mai joase (pînă la -200°C). Domeniul de utilizare și intervalul de temperatură în care poate fi utilizat un termocuplu depinde de construcția acestuia. Dintre avantajele termocuplurilor trebuie menționate: precizia destul de mare, posibilitatea transmiterii semnalului la distanță și posibilitatea verificării temperaturii în mai multe puncte în care se montează cîte un termocuplu, utilizînd un comutator care conectează aparatul indicator pe rînd la fiecare dintre termocupluri.

Măsurarea temperaturii cu ajutorul termocuplului se bazează pe fenomenul termoelectric: dacă într-un circuit format din două conductoare din materiale diferite și sudate la cele două extremități se încălzește unul dintre cele două puncte de contact, în circuit apare o tensiune electromotoare, care este funcție de temperaturile celor două extremități. Astfel, dacă, de exemplu, se consideră două conductoare: unul A din cupru și altul B din platină, la încălzirea lipiturii 1 (fig. 11-4) în circuit va apărea un curent electric (lipitura 2 avînd temperatura mediului ambiant sau mai precis o temperatură menținută constantă). În lipitura încălzită 1, curentul electric trece de la conductorul de platină B la conductorul de cupru A , iar în lipitura rece 2 în sens invers. Tensiunea electromotoare care apare datorită încălzirii a două conductoare din materiale diferite și sudate între ele se numește tensiune termoelectromotoare. Explicația fenomenului termoelectric se bazează pe potențialul de ieșire al electronilor liberi din metale. În metale diferite numărul electronilor liberi este diferit. Din această cauză, în locul de contact al metalelor A și B va avea loc o difuzie a electronilor liberi. Astfel, în lipitura 1, electronii vor difuza din metalul A , care are mai mulți electroni liberi în unitatea de volum decît metalul B , în metalul B . În consecință, metalul A se va încărca pozitiv, metalul B se va încărca negativ, iar între cele două metale va apărea o diferență de potențial. Deoarece numărul electronilor liberi din fiecare metal depinde de temperatura lipiturilor 1 și 2, reiese că tensiunile electromotoare care apar în cele două puncte 1 și 2 vor avea valori diferite. Dacă se notează cu t temperatura lipiturii calde 1 și cu t_0 temperatura lipiturii reci 2, atunci tensiunea termoelectromotoare va fi:

$$e_{AB}(t, t_0) = e_{BA}(t) - e_{BA}(t_0) \quad (11-3)$$

Dacă temperatura lipiturii 2 este menținută constantă, atunci tensiunea termoelectromotoare rezultantă va fi:

$$e_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - C = f(t). \quad (11-4)$$

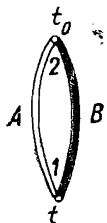


Fig. 11 — 4. Cuplu termoelectric.

Din această relație rezultă că tensiunea termoelectromotoare care apare în circuitul a două conductoare din materiale diferite și sudate între ele depinde de temperatura lipiturilor 1 și 2. Lipitura 2, a cărei temperatură este menținută constantă, se numește *lipitură rece*. Lipitura 1, care este pusă la temperatura măsurată, se numește *lipitură caldă*. Grosimea sîrmei termoelectrozilor nu are nici o influență asupra valorii tensiunii termoelectromotoare, aceasta depinzînd exclusiv de natura metalelor utilizate și de diferența de temperatură dintre punctul de sudură și capetele reci. Pentru măsurarea tensiunii termoelectromotoare se utilizează milivoltmetre sau circuite de compensare (potențiometre). Conectarea milivoltmetrului se face prin întreprinderea circuitului, așa cum se arată în figura 11-5.

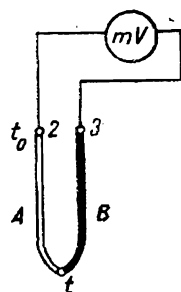


Fig. 11—5. Conectarea milivoltmetrului la termocuplu.

Pentru a putea caracteriza metalele din punct de vedere al tensiunii termoelectromotoare, s-a ales ca termoelectrod de referință (normal) platina, deoarece are un punct ridicat de topire și se obține ușor în stare pură. Astfel, în practică se folosesc tabele în care se dau valorile tensiunii termoelectromotoare a fiecărui metal în raport cu platina. Cu ajutorul acestor tabele se poate calcula tensiunea termoelectromotoare, care apare între alte două materiale oarecare folosite la confecționarea termoelectrozilor.

De exemplu, la temperatura $t = 100^{\circ}\text{C}$ și temperatura lipiturilor reci $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ termoelectrozii din cromel și alumel dezvoltă în cuplu cu platina următoarele tensiuni:

$$e_{C, Pt}(100^{\circ}\text{C}; 0^{\circ}\text{C}) = + 3,13 \text{ mV},$$

$$e_{A, Pt}(100^{\circ}\text{C}; 0^{\circ}\text{C}) = - 1,02 \text{ mV}.$$

Tensiunea termoelectromotoare a termocuplului din cromel-alumel se determină cu ajutorul relației:

$$\begin{aligned} e_{C,A}(100^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}) &= e_{C, Pt}(100^{\circ}\text{C}; 0^{\circ}\text{C}) - e_{A, Pt}(100^{\circ}\text{C}; 0^{\circ}\text{C}) = \\ &= 3,13 - (-1,02) = 4,15 \text{ mV}. \end{aligned}$$

Semnul tensiunii termoelectromotoare rezultate indică sensul curentului în circuitul termocuplului.

Pentru confecționarea termoelectrozilor se folosesc metale care nu-și schimbă în timp proprietățile fizice în intervalul de temperatură în care sînt utilizate. Pentru a avea o precizie mare de măsurare este necesar ca tensiunea termoelectromotoare a metalelor alese să fie mare, iar coeficientul de variație cu temperatura (coeficientul de temperatură) al rezistenței electrice să fie mic.

Termocuplurile se pot confecționa din metale nobile, din metale obișnuite sau din diferite aliaje. Termocuplurile din metale nobile conțin în general platină și se folosesc la măsurarea temperaturilor industriale peste 1100°C

și la măsurări de precizie în laboratoare. Termocuplurile din metale obișnuite se folosesc pe scară largă la măsurarea temperaturii în cele mai variate domenii ale tehnicii. Cele mai răspândite termocupluri au la bază aliaje de crom, aluminiu, cupru etc. Pentru măsurarea temperaturilor înalte se folosesc termocupluri din molibden, wolfram.

2. CONSTRUCȚIA TERMOCUPLURILOR

Datorită diversității condițiilor de utilizare și intervalului variat de temperatură supus măsurării, termocuplurile pot avea construcții diferite.

În general, lipitura caldă se execută prin sudare la flacăra arcului electric sau la flacăra de acetilenă. Electrozii au de obicei forma de fire sau benzi izolate între ele din punct de vedere electric. Lipitura caldă poate fi izolată sau legată direct la vârful tubului de protecție. Pentru o bună funcționare a termocuplului este necesară protejarea acestuia împotriva acțiunii gazelor fierbinți sau corosive, care pot distruge electrozii. Din aceste motive, termocuplul se introduce pentru protejare mecanică și anticorosivă într-o teacă de protecție. Teaca de protecție trebuie să aibă o rezistență mecanică corespunzătoare condițiilor de lucru, să fie rezistentă la schimbări bruște de temperatură, să aibă o conductibilitate termică bună și să împiedice difuzarea gazelor la termoelectrozi. Alegerea materialelor pentru izolația electrică a electrozilor este de asemenea determinată de domeniul de temperatură în care se utilizează termocuplul. Astfel, se folosește emailul până la

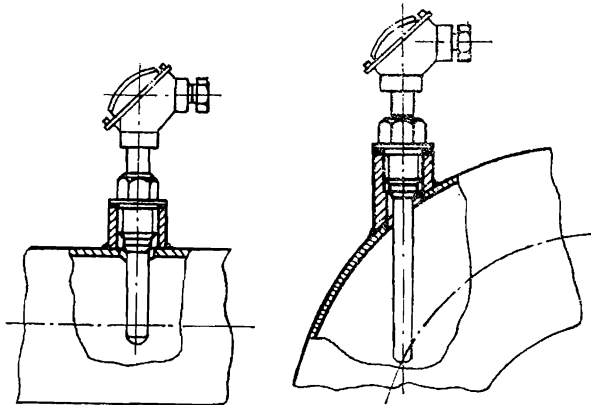


Fig. 11—6. Construcția și montarea termocuplurilor.

100—150°C, mărgelele din sticlă până la 1000°C, mărgelele din porțelan până la 1300—1500°C.

Din punct de vedere constructiv, termocuplurile au forme variate. Cel mai răspândit este termocuplul în formă de tub, avînd în interior termoelectrozi din fire izolate între ele (fig. 11-6). Capătul termocuplului care formează

o cutie, unde se găsesc bornele de legătură, trebuie să fie închis cu un capac metalic sau din material plastic, pentru a proteja conexiunile împotriva pătrunderii prafului, a apei etc., permițând încă o examinare periodică. Bornele trebuie să fie izolate electric una față de alta și fiecare față de cutie. La bornele de legătură figurează semnele + (plus) și - (minus), care indică polaritatea termocuplului. De obicei, pe cutia de conexiuni sînt trecute următoarele date: temperatura maximă de utilizare și simbolul termocuplului.

3. UTILIZĂRILE TERMOCUPLURILOR

Măsurarea temperaturii oțelului are o mare însemnătate în dirijarea elaborării oțelului și mai ales în automatizarea elaborării șarjelor de oțel. Aparatele folosite în acest scop trebuie să satisfacă următoarele cerințe: să fie ușor de mînuit, să fie robuste, să aibă un preț de cost cît mai redus și să poată fi manevrate de persoane fără o calificare înaltă. Termocuplurile îndeplinesc aceste condiții. Cele mai indicate materiale pentru confecționarea termoelectrozilor sînt: platina, rhodiul și wolframul. În cazul folosirii termoelectrozilor din metale obișnuite sudura trebuie controlată și refăcută periodic. În ultimul timp, pentru mărirea siguranței de funcționare se folosesc termocupluri cu patron înlocuibil. Astfel, termocuplul prezentat în figura 11-7 este alcătuit dintr-un patron de măsurare înlocuibil, care poate fi reînnoit după fiecare măsurare. Înlocuirea patronului care conține termoelectrozii 2 într-un tub de cuarț 1 simplifică lucrările de pregătire a unei măsurări. Învelișul protector 3 al termoelectrozilor se topește prin cufundare în masa topită. Patronul este format dintr-un corp de ceramică 4, pe care

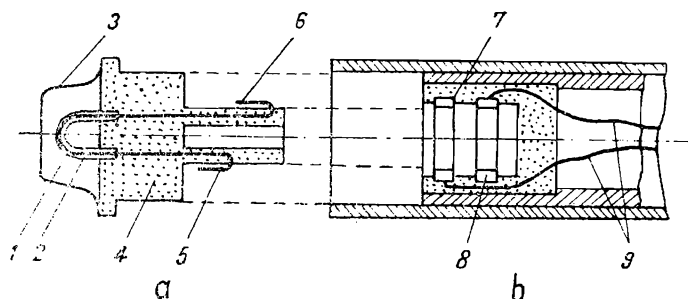


Fig. 11—7. Termocuplu cu patron înlocuibil:

a — patron de măsurare înlocuibil; b — corpul traductorului în care se fixează patronul prin introducere.

sînt montate contactele de legătură 5 și 6, care fac conexiunile cu contactele inelare 7 și 8 din corpul traductorului. La aceste contacte sînt conectate firele de legătură 9 care merg la aparatul de măsurat. Datorită faptului că termoelectrozii sînt în contact direct cu masa topită, măsurarea se efectuează într-un timp scurt (3—4 s). Corpul traductorului (fig. 11-7, b) are lungime

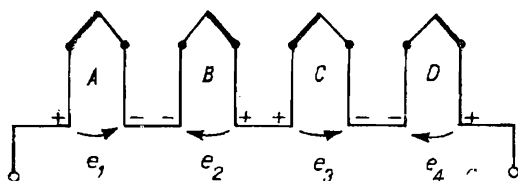


Fig. 11—8. Traductor pentru măsurarea vitezei de variație a temperaturii.

temperaturii unui mediu. Variația temperaturii mediului de lucru trebuie să determine apariția unei mărimi de ieșire diferită de zero la bornele traductorului, iar atunci când temperatura este invariabilă, mărimea de ieșire trebuie să fie zero. Cele mai utilizate traductoare pentru măsurarea variației temperaturii sînt de tip generator, utilizînd termocupluri. Într-o formă simplificată, un astfel de traductor poate fi considerat ca fiind constituit dintr-un număr par de cupluri termoelectrice conectate în serie. Jumătate dintre acestea au o inerție termică mică, iar cealaltă jumătate o inerție termică mare. Aceste termocupluri sînt conectate ca în figura 11-8. Principiul de funcționare a acestui traductor se bazează pe faptul că temperatura cuplurilor termoelectrice cu inerție mare (notate cu *A* și *C* în figura 11-8) rămîne în urma temperaturii celor cu inerție termică mică (notate cu *B* și *D* în fig. 11-8). Prin urmare, la bornele traductorului va exista semnal atît timp cît temperaturile celor două tipuri de termocupluri sînt diferite. Este evident că în regim permanent suma tensiunilor termoelectromotoare trebuie să fie egală cu zero. Termocuplurile cu inerție termică mică se realizează utilizînd termoelectrozi de diametru cît mai mic și cu o masă metalică cît mai mică în punctul de sudură. Termocuplurile cu inerție termică mare se pot obține utilizînd plăcuțe adiționale pentru a mări masa punctului de sudură sau izolînd o sudură obișnuită într-un material izolant (ceramică, sticlă etc.). În general, aceste tipuri de traductoare pot avea numeroase variante constructive, care diferă prin izolația termică și electrică.

suficient de mare, pentru a putea măsura temperatura în interiorul cuptorului.

La măsurarea temperaturii fontei lichide trebuie efectuate măsurări de lungă durată. Cele mai utilizate sînt termocuplurile platină, rhodiu-platină (Pt, Rh—Pt).

În unele cazuri este necesară măsurarea vitezei de variație a

4. CONECTAREA TERMOCUPLURILOR LA APARATE INDICATOARE

Pentru conectarea termocuplurilor la un milivoltmetru indicator sau înregistrator sînt necesare conductoare de legătură. Deoarece dezavantajul principal al măsurării temperaturii cu termocupluri este influența temperaturii mediului exterior asupra lipiturilor reci, conductoarele de legătură trebuie să fie identice din punct de vedere termoelectric. Două conductoare sînt identice din punct de vedere termoelectric într-un interval de temperatură, dacă tensiunea termoelectromotoare care apare în cuplul compus din acestea este neglijabilă. În figura 11-9 este prezentată schema de măsurare a temperaturii cu un termocuplu utilizînd conductoare de legătură. Deoarece este posibil să se găsească

materiale pentru conductoarele de legătură identice din punct de vedere termoelectric cu termoelectrozii, temperatura lipiturilor 1 și 2 poate varia într-un interval restrâns de temperatură (de exemplu, până la 100°C). În acest caz, lipiturile reci vor fi punctele 3 și 4, care, fiind la distanță de capul armăturii termocuplului, pot fi menținute mai ușor la o temperatură constantă (este necesar ca lipiturile reci 3 și 4 să fie menținute la o temperatură constantă, pentru ca precizia de măsurare a temperaturii să nu fie influențată de temperatura mediului exterior).

Lipiturile reci pot fi introduse într-o cutie de legătură, unde se menține o temperatură constantă cu ajutorul unui termostat sau (mai rar) în tuburi de protecție îngropate în pământ la o adâncime de 1,5–2 m.

În cazul termocuplurilor din metale obișnuite, pot fi utilizate pentru prelungire conductoare din același material. Pentru termocupluri din metale nobile, trebuie însă utilizate conductoare de prelungire din alt material. Astfel, pentru termocuplul din platină, rhodiu-platină sînt folosite conductoare de prelungire din aliaj cupru-nichel.

În unele cazuri se folosește o metodă care prevede introducerea unei corecții, în funcție de temperatura lipiturilor reci. Astfel, pentru obținerea unei tensiuni de corecție se folosește o punte electrică, conectată ca în figura 11-10. Rezistențele R_1 , R_2 , R_3 sînt confecționate din sîrmă de manganină, iar rezistența R_4 din sîrmă de cupru. Valoarea rezistenței R_4 depinde mult de temperatura mediului ambiant, deoarece cuprul are un coeficient mare de variație a rezistenței cu temperatura (aproximativ 0,4% pentru 1°C). La temperatura lipiturilor reci, pentru care se face gradarea, puntea este în echilibru. Cînd se schimbă temperatura lipiturilor reci, puntea se dezechilibrează datorită variației rezistenței R_4 și milivoltmetrul conectat într-una din diagonalele punții indică o tensiune de corecție. Rezistența R_4 este astfel dimensionată, încît la variația temperaturii exterioare, tensiunea de corecție din diagonala punții să compenseze abaterea tensiunii termoelectromotoare a termocuplului.

După cum reiese din figura 11-11, la măsurarea tensiunii termoelectromotoare a unui termocuplu, în circuitul de măsurare apare un curent electric continuu. Notînd cu R_v rezistența internă a milivoltmetrului, cu R_c rezistența totală a firelor de legătură și cu R_T rezistența internă a termocuplului, curentul electric care ia naștere în circuit este:

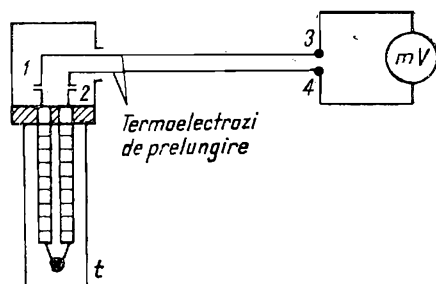


Fig. 11—9. Schema de măsurare a temperaturii cu un termocuplu, utilizînd conductoare de legătură.

$$I = \frac{e(t, t_0)}{R_v + R_c + R_T}. \quad (11-5)$$

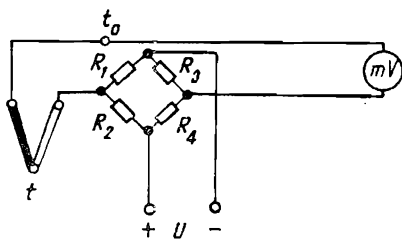


Fig. 11—10. Compensarea variației temperaturii lipiturilor reci cu o punte electrică.

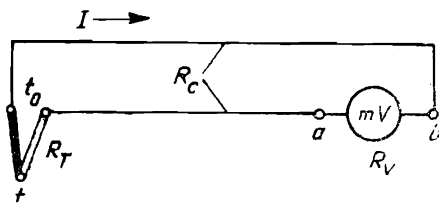


Fig. 11—11. Schemă de principiu pentru studiul erorilor

Cunoscând valoarea curentului electric în circuitul milivoltmetrului și rezistența sa internă, rezultă că tensiunea sa la borne se determină cu ajutorul relației:

$$U_{ab} = IR_v = \frac{e(t, t_0)}{R_v + R_c + R_T} R_v. \quad (11-6)$$

Din această relație reiese că tensiunea la bornele milivoltmetrului U_{ab} va fi egală cu tensiunea de la bornele termocuplului $e(t, t_0)$ numai atunci când milivoltmetrul are o rezistență internă infinită, adică nu consumă putere. Din aceste motive, pentru etalonare și măsurări de precizie se folosesc compensatoare de tensiune. În cazul măsurărilor de precizie mai mică (0,5—2,5) se folosesc milivoltmetre. Pentru ca variația rezistenței interne a milivoltmetrului cu temperatura să fie redusă, se micșorează rezistența electrică a cadrului mobil care este confecționat din sîrmă de cupru și se introduce o rezistență auxiliară din manganină. Din expresia lui U_{ab} reiese că asupra preciziei de măsurare influențează și rezistența internă a termocuplului și a firelor de legătură. Din aceste motive, pentru firele de legătură se folosesc conductoare cu o secțiune de minimum 1,5 mm², iar pe cadranul milivoltmetrului se scrie valoarea sumei rezistențelor R_c și R_T pentru care a fost gradat. Abaterea maximă a rezistenței totale nu trebuie să depășească 1%, pentru măsurări de laborator și 5% pentru măsurări industriale.

5. CARACTERISTICILE DE FUNCȚIONARE ALE TERMOCUPLURILOR ÎNTR-UN SISTEM AUTOMAT

Termocuplul ca element component într-o schemă de automatizare, de exemplu într-un sistem automat pentru menținerea constantă a temperaturii, este definit prin caracteristica sa statică și caracteristica sa dinamică.

Aceste caracteristici sînt necesare pentru studiul performanțelor unui sistem automat, unde termocuplul este conectat direct sau prin intermediul unui adaptor (de exemplu, adaptorul de tensiune continuă-curent continuu).

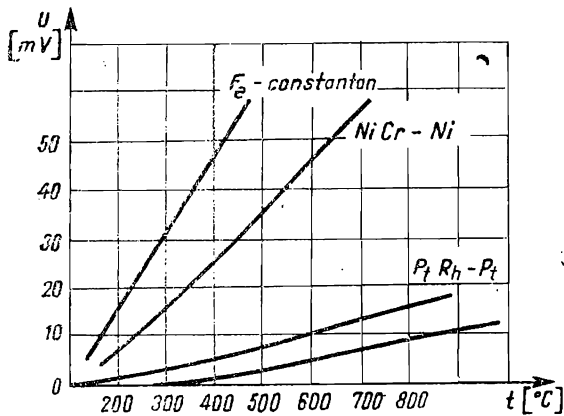
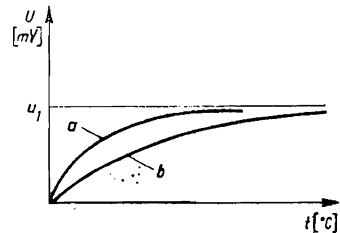


Fig. 11—12. Caracteristicile statice ale unor termocupluri

Fig. 11—13. Caracteristicile dinamice pentru două termocupluri: a — cu inerție termică mică; b — cu inerție termică mare.



Adaptorul de tensiune continuă — curent continuu. Se știe că un termocuplu are la bornele sale o tensiune continuă proporțională cu temperatura. În sistemele de reglare cu semnal unificat între blocurile componente s-a adoptat ca semnal unificat semnalul de curent continuu de 2—10 mA. Din această cauză, pentru ca informația dată de termocuplu să poată fi folosită într-o instalație de automatizare, este necesar să se convertească tensiunea continuă de la bornele termocuplului într-un semnal de curent continuu.

În acest scop, cu ajutorul adaptorului, tensiunea continuă este modulată în curent alternativ, amplificată cu un amplificator de curent alternativ, iar în final se efectuează operația de redresare. Astfel, la ieșirea adaptorului se obține un semnal de curent continuu în intervalul de valori dorit.

Caracteristica statică a unui termocuplu reprezintă dependența între valoarea tensiunii termoelectromotoare și temperatură. Această dependență trebuie să fie liniară în tot domeniul de măsurare a temperaturii. Pentru ridicarea acestei caracteristici se folosește un termocuplu etalon, montat în același loc cu termocuplul supus verificării. Se stabilesc apoi diferite temperaturi în cuptor. Când temperatura în cuptor are o valoare constantă se citesc indicațiile respective. În figura 11-12 sînt prezentate caracteristicile statice pentru cîteva tipuri mai uzuale de termocupluri. Panta caracteristicilor indică sensibilitatea față de temperatură, în mV/°C.

Caracteristica dinamică a unui termocuplu reprezintă variația în timp a valorii tensiunii termoelectromotoare atunci cînd are loc o variație bruscă a temperaturii lipiturilor calde. Pentru ridicarea acestei caracteristici, termocuplul este introdus brusc într-un cuptor cu o temperatură constantă (căreia îi corespunde tensiunea U_1) și se citesc la aparatul de măsurat valorile tensiunii termoelectromotoare la intervale egale de timp. În figura 11-13 sînt prezentate caracteristicile dinamice pentru două termocupluri. Aceste caracteristici indică variația tensiunii termoelectromotoare în timp, în cazul unor termocupluri cu inerții termice diferite. Inerția termică a unui termocuplu depinde de natura materialului din care este confecționată teaca de protecție, de izolația electrică utilizată și de dimensiunile acestora.

6. GRADAREA TERMOCUPLURILOR

Gradarea unui termocuplu (de exemplu, Pt, Rh-Pt) se efectuează în felul următor: în conformitate cu Scara internațională practică de temperatură, de la 630,5°C (temperatura de solidificare a stibiului) la 1063°C (temperatura de solidificare a aurului), orice temperatură se definește cu ajutorul relației:

$$e = a + b t + c t^2, \quad (11-7)$$

unde e este tensiunea termoelectromotoare a termocuplului Pt, Rh—Pt (10% Rh) atunci cînd sudura caldă se găsește la temperatura $t^\circ\text{C}$, iar sudura rece la 0°C . Coeficienții a , b , c sînt niște constante ale căror valori diferă de la un termocuplu la altul. Acești coeficienți se determină introducînd termocuplul în medii cu trei temperaturi cunoscute (temperatura de solidificare a stibiului, a argintului și a aurului). Cunoscînd temperatura după indicațiile termocuplului Pt, Rh—Pt luat ca termometru etalon, se pot grada prin comparație și alte termocupluri.

E. TRADUCTOARE TERMOREZISTIVE

1. TERMOREZISTENȚE

a. Principiul de funcționare al termorezistențelor. Termorezistențele sînt utilizate pe scară largă în industrie la măsurarea temperaturilor cuprinse între -120°C și $+500^\circ\text{C}$. Ele pot fi folosite uneori și în intervalul de temperaturi de la -200°C la $+850^\circ\text{C}$. Principiul de funcționare al termorezistențelor se bazează pe proprietatea unor conductoare de a-și modifica rezistivitatea electrică la variația temperaturii. Materialele din care se confecționează termorezistențele trebuie să îndeplinească următoarele condiții, să nu-și schimbe proprietățile fizice și chimice în timp, coeficientul de variație cu temperatura al rezistivității electrice (al rezistenței electrice) să fie cît mai mare, variația rezistivității electrice cu temperatura să fie cît mai liniară, iar proprietățile materialului să poată fi ușor reproduse. Dintre materialele care satisfac condițiile enumerate mai sus fac parte: platina, cuprul, nichelul, fierul, precum și unele aliaje. Platina este utilizată atît la măsurări industriale cît și la operații de etalonare.

După cum se știe, coeficientul de variație cu temperatura al rezistenței electrice confecționată din platină crește cu cît cantitatea de impurități în metal este mai mică. Din aceste motive, în măsurările în care se cere o precizie mare se folosesc termorezistențe confecționate din platină de puritate maximă. Deoarece se urmărește ca termorezistențele să fie ieftine, în mă-

surările de precizie mai mică se folosesc metale obișnuite. Astfel, cuprul are o variație liniară a rezistenței electrice în funcție de temperatură, care se poate exprima prin relația:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad (11-8)$$

unde α este coeficientul de variație cu temperatură al rezistenței electrice. Dezavantajul principal al cuprului este rezistivitatea sa mică în comparație cu platina. Alt material utilizat la confecționarea termorezistențelor este nichelul, care are o rezistivitate mare și un coeficient de temperatură ridicat. Aceleași proprietăți le are și fierul, însă datorită faptului că se oxidează ușor, utilizarea lui este limitată. În figura 11-14 se reprezintă variația indicelui R_t/R_0 cu temperatura pentru aceste metale.

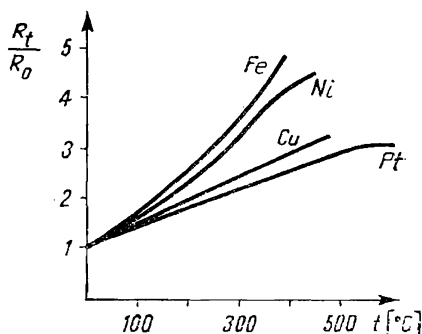


Fig. 11—14. Variația indicelui R_t/R_0 cu temperatura pentru diverse metale

Aliajele utilizate la confecționarea termorezistențelor sînt: constantanul, manganina, bronzul fosforos etc.



Fig. 11—15. Suport din mică în formă de cruce utilizat în construcția termorezistențelor.



Fig. 11—16. Suport în formă de placă cu margini zimțate utilizat în construcția termorezistențelor.

Valoarea minimă a rezistenței electrice a unui traductor termorezistiv este determinată de rezistența electrică a conductoarelor de legătură pînă la aparatul de măsurat. Din aceste motive, de obicei valoarea rezistenței la 0°C se ia de cel puțin $40\ \Omega$. Valoarea maximă a rezistenței este de asemenea limitată, deoarece utilizarea unor conductoare subțiri scade rezistența mecanică a elementului termosensibil. Astfel, valoarea maximă a rezistenței în general nu depășește $100\ \Omega$.

b. Construcția termorezistențelor. Din punct de vedere constructiv, termorezistențele se prezintă sub formă de fire sau benzi, care se înfășoară pe un suport special. Materialul suportului trebuie să fie termostabil și să aibă o rezistență mecanică ridicată. Pentru temperaturi mari se folosesc suporturi din cuarț și porțelan, iar pentru temperaturi joase se folosește mica. În practică se întîlnesc următoarele tipuri de suporturi: suporturi elicoidale din porțelan și suporturi din mică în formă de cruce (fig. 11-15), sau sub forma unei plăci cu margini zimțate (fig. 11-16), pentru a se putea menține distanța între conductoare. Capetele rezistenței sînt în contact cu două benzi metalice, care fac legătura cu bornele termorezistenței. Așa cum se vede în figura 11-15, rezistența este conectată la bornele

aflate în capătul termorezistenței, de unde pleacă conductoarele de legătură, care nu trebuie să dezvolte o tensiune termoelectromotoare în cuplu cu materialul rezistenței electrice. Pentru temperaturi joase, pînă la 150°C, se folosesc conductoare de legătură din cupru. La temperaturi mari se folosesc conductoare de legătură din materiale termorezistente, iar pentru operații de etalonare se folosesc conductoare de legătură din platină.

c. **Gradarea termorezistențelor.** În conformitate cu Scara internațională practică de temperatură de la 0°C pînă la 630,5°C, care reprezintă temperatura de solidificare a stibiului, temperatura se definește cu ajutorul următoarelor formule de interpolare:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (11-9)$$

unde R_t reprezintă rezistența electrică la temperatura t a firului de platină a unei termorezistențe, R_0 este rezistența electrică a aceluiași fir de platină măsurată la 0,000°C, iar constantele A , B se determină cunoscînd valorile rezistenței R_t în punctele de fierbere ale apei (100,0°C) și sulfului (444,6°C). După determinarea rezistenței R_0 și a constantelor A și B se obține o termorezistență etalon, care se poate utiliza pentru măsurări de precizie sau în operații de verificare și etalonare a altor tipuri de rezistențe.

Izolația electrică a conductoarelor, materialele pentru tuburile de protecție și capătul termorezistenței trebuie să îndeplinească aceleași condiții ca în cazul termocuplurilor.

2. TERMISTOARE

În ultimul timp, o largă utilizare au căpătat termorezistențele care folosesc semiconductoare. Aceste traductoare termorezistive se mai numesc și termistoare. Materialul de bază utilizat în fabricarea termistoarelor este un oxid sau un amestec de oxizi de metale cu proprietăți semiconductoare (titan, vanadiu, mangan, fier, cupru, tungsten, uraniu). Alegerea acestor materiale este determinată de valoarea rezistivității, de coeficientul de variație cu temperatura al rezistenței electrice, de stabilitatea în timp a parametrilor și de temperatura maximă de utilizare. După purificare și măcinare, amestecul este presat cu un adaos de liant în diferite forme. Aceste forme sînt introduse în cuptor la temperaturi înalte, în vederea realizării concentrației dorite în oxigen. După scoaterea din cuptor se sudează legăturile exterioare. Formele constructive ale termistoarelor sînt foarte variate: plăcuțe, baghete, discuri sau sfere la care sînt sudate firele de legătură.

Caracteristica rezistenței unui termistor în funcție de temperatură este dată în figura 11-17 (în scară logaritmică pe ordonată) și poate fi aproximată prin relația:

$$R_t = R_0 e^{-b/T}, \quad (11-10)$$

unde T este temperatura absolută, iar b o constantă.

După cum se vede din figura 11-17, coeficientul de variație cu temperatura al rezistenței electrice este negativ.

Avantajele principale pe care le prezintă termistoarele în comparație cu termorezistențele sînt:

— valoarea mare a coeficientului de variație cu temperatura al rezistenței electrice, care poate ajunge pînă la 3% pe °C. Acest factor determină sensibilitatea mare a termistoarelor;

— rezistivitatea mare a semiconductoarelor permite construirea de traductoare cu o rezistență ohmică mare. Acest fapt face posibilă utilizarea termistoarelor pentru măsurări la distanță, deoarece se poate neglija influența rezistenței mult mai mici a conductoarelor de legătură;

— deoarece termistoarele se pot confecționa cu dimensiuni reduse, inerția termică și influența termistorului asupra cîmpului de temperatură sînt neglijabile.

Totuși, termistoarele prezintă un mare dezavantaj, prin faptul că nu se pot executa cu toleranțe reduse. Din această cauză, termistoarele trebuie să fie prevăzute cu rezistențe montate în serie sau în paralel, pentru a se obține anumite valori nominale ale rezistenței și ale coeficientului de variație cu temperatura al rezistenței. Un alt dezavantaj al termistoarelor îl constituie faptul că parametrii R_0 și b variază în timp. Din acest motive, termistoarele în general nu sînt interschimbabile și este necesară o gradare individuală a aparatelor de măsurat. Datorită sensibilității mari și datorită faptului că coeficientul de variație cu temperatura al rezistenței unui termistor este

negativ, termistoarele se utilizează și pentru compensarea variației unor rezistențe cu temperatura (de exemplu, în scheme electronice cu transistoare).

3. APARATE DE MĂSURAT CU TRADUCTOARE TERMOREZISTIVE

Aparatele de măsurat utilizate în cazul termorezistențelor sînt: punți Wheatstone echilibrate, neechilibrate și logometre. În figura 11-18, a este reprezentată o punte alimentată cu

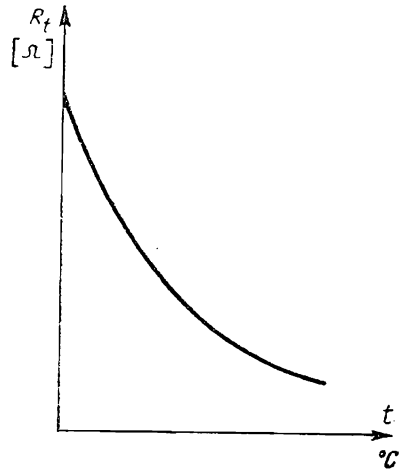


Fig. 11-17. Variația rezistenței unui termistor cu temperatură

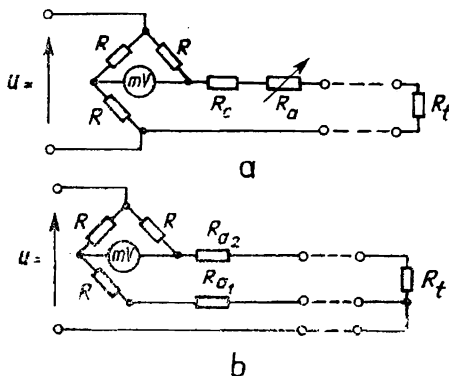


Fig. 11-18. Montaje cu termorezistențe.

o tensiune constantă. Se observă că rezistențele R_c și R_a sînt incluse în rezistența măsurată. În această schemă R_c este rezistența electrică de control, care reprezintă rezistența brațului la o anumită temperatură θ , iar R_a o rezistență reglabilă. Pentru a controla funcționarea schemei la temperatura θ se scurtcircuitază rezistența R_t (termorezistența) și se variază rezistența R_a pînă cînd pe aparatul indicator se citește temperatura θ . După această operație de control se scurtcircuitază rezistența R_c și se înlătură scurtcircuitul de la R_t . Conductoarele de legătură au lungimi mari și rezistența lor are o valoare cuprinsă între 10 și 20 Ω . Cînd temperatura mediului variază, rezistența conductoarelor de legătură provoacă erori de măsurare, deoarece variațiile acestora sînt luate drept o variație a valorii termorezistenței.

Pentru a reduce erorile datorită variației rezistenței conductoarelor de legătură se folosește sistemul trifilar de conectare a rezistenței cu puntea (fig. 11-18,b). În această schemă, două fire de legătură se găsesc în brațe alăturate, iar unul în circuitul de alimentare al punții electrice. Pentru a demonstra avantajul acestei scheme se vor folosi următoarele notații pentru elementele componente: R_{a1} și R_{a2} rezistențele electrice ale fiecărui conductor de legătură, R rezistențele din brațele punții, iar R_{t0} valoarea termorezistenței la temperatura inițială t_0 . Condiția de echilibru a punții este următoarea:

$$R(R + R_{a1}) = R(R_{a2} + R_{t0}). \quad (11-11)$$

Simplificînd, se obține:

$$R + R_{a1} = R_{a2} + R_{t0}. \quad (11-12)$$

Deoarece se poate alege $R = R_{t0}$, rezultă că influența conductoarelor de legătură este neglijabilă, dacă acestea sînt identice, adică dacă $R_{a1} = R_{a2}$ și dacă sînt supuse la aceeași variație a temperaturii mediului exterior.

Schemele din figura 11-18 a și b pot fi acordate astfel încît la temperatura inițială aparatul indicator să arate valoarea 0 (zero). Cînd temperatura mediului ce trebuie măsurată crește, puntea se dezechilibrează. Dacă tensiunea de alimentare a punții și rezistențele electrice R se mențin constante, atunci tensiunea de dezechilibru va depinde de creșterea valorii rezistenței R_t . Din aceste motive, acest montaj se numește montaj în punte neechilibrată. Dezavantajul acestor scheme constă în faptul că variația tensiunii de alimentare a punții influențează indicațiile aparatului de măsurat. Pentru măsurarea dezechilibrului punților se folosesc în general milivoltmetrele.

Uneori, în automatizările industriale este necesar ca temperaturile în anumite puncte să fie înregistrate pe diagrame. În acest scop se folosesc punți echilibrate automate. O punte echilibrată automată (fig. 11-19) are ca element principal

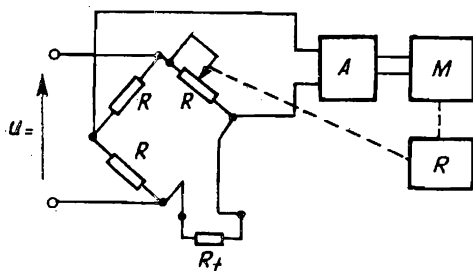


Fig. 11—19. Schema bloc a unei punți echilibrate automate.

o punte electrică, cu o rezistență variabilă într-un braț. La creșterea temperaturii rezistența electrică R_t a traductorului variază și puntea se dezechilibrează. Tensiunea de dezechilibru se amplifică de către amplificatorul A și se aplică unui motor M , care prin intermediul unui reductor R schimbă poziția cursorului rezistenței variabile. Motorul se va roti atît timp cît puntea este dezechilibrată. Sensul de rotație al motorului depinde de sensul tensiunii de dezechilibru. Prin urmare, atunci cînd puntea este adusă la echilibru prin varierea rezistenței reglabile, motorul se va opri, iar poziția cursorului va depinde de variația rezistenței R_t . Prin urmare, poziția cursorului rezistenței variabile poate fi gradată în 0°C .

În cazul cînd sînt necesare măsurări de precizie se folosesc ca aparate de măsurat logometrele. Aceste aparate înlătură erorile de măsurare cauzate de variația tensiunii de alimentare a punții electrice. În cazul logometrelor deplasarea acului indicator depinde de raportul curenților prin cele două bobine ale aparatului de măsurat.

F. PIROMETRE DE RADIAȚIE

1. GENERALITĂȚI

Pentru măsurarea temperaturilor înalte nu pot fi utilizate traductoarele în contact cu mediul respectiv, datorită coroziunii materialelor. Astfel, termocuplurile pot fi utilizate la temperaturi peste 1400°C , numai dacă se folosesc materiale speciale pentru izolație și pentru termoelectrozi. În mod identic, termorezistențele pot fi utilizate pînă la cel mult 850°C . Din aceste motive, pentru măsurarea temperaturilor înalte sînt utilizate traductoare fără contact cu mediul analizat.

Principiul de funcționare al pirometrelor de radiație se bazează pe dependența între energia radiată de un corp încălzit și temperatura acestuia. Pentru a înțelege principiul de funcționare al diferitelor tipuri de pirometre de radiație este necesară cunoașterea legilor fundamentale ale radiației termice.

Radiația care cade pe un corp poate fi absorbită, reflectată, sau lăsată să treacă. Prin *corp negru absolut* se înțelege un corp (abstract) care absoarbe întreaga energie radiantă ce cade asupra lui (coeficientul său de absorbție este egal cu 1). Un asemenea corp nu există în natură. Drept model fizic al unui corp negru absolut poate servi o incintă închisă cu pereții impermeabili pentru radiații și care are toate punctele interioare la aceeași temperatură, prevăzută cu un orificiu. Toate razele care cad dinafară prin orificiu în interiorul incintei sînt absorbite în urma reflexiilor succesive pe suprafața interioară. Toate corpurile fizice diferă de corpul negru absolut; ele absorb numai o parte din energia incidentă, și au prin urmare un coeficient de ab-

sorbție diferit de unitate. Deoarece, la orice corp puterea de radiație sau de emisie este egală cu puterea de absorbție, coeficientul de absorbție este o mărime caracteristică pentru fiecare corp. Puterea de emisie a unui corp fizic diferă de puterea de emisie a unui corp negru la aceeași temperatură.

Metodele de măsurare cu ajutorul pirometrelor de radiație sînt următoarele:

a. **Metoda de măsurare a temperaturii utilizînd variația cu temperatura a energiei totale de radiație.** Energia totală de radiație a corpului negru absolut, precum și distribuția spectrală a radiației corpului negru absolut variază cu temperatura; energia totală E , radiată de corpul negru la temperatura T este definită prin legea lui Ștefan Boltzman:

$$E_s = \sigma T^4, \quad (11-13)$$

unde σ este o constantă de radiație a corpului negru.

Această relație care exprimă faptul că energia de radiație variază foarte mult cu temperatura stă la baza principiului de funcționare a pirometrelor de radiație totală. Prin aceasta se înțelege că este necesar să se măsoare energia emisă pe toate lungimile de undă de un corp încălzit. Însă, deoarece un corp real are un coeficient de absorbție diferit de unitate, un pirometru gradat după corpul negru absolut va indica o temperatură mai mică decît temperatura reală. Această diferență, care consituie o eroare, se poate lua în considerație prin introducerea unei corecții atunci cînd se cunoaște coeficientul de absorbție (numit uneori și coeficient de negreală).

b. **Metoda de măsurare a temperaturii utilizînd variația intensității radiației monocromatice a corpului negru absolut cu temperatura.** Această metodă se bazează pe legea lui Planck. Legea lui Planck arată că energia radiației corpului negru absolut $E_{0\lambda}$ într-o bandă spectrală îngustă cuprinsă între lungimile de undă λ și $\lambda + \Delta\lambda$ este definită prin relația:

$$E_{0\lambda} = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \Delta\lambda, \quad (11-14)$$

în care coeficienții c_1 și C_2 sînt niște constante empirice. După cum se vede din figura 11-20, la creșterea temperaturii energia radiată crește, dar în măsură diferită pentru diferite lungimi de undă.

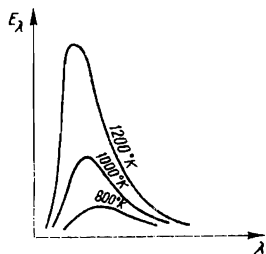


Fig. 11—20. Variația intensității de radiație a corpului negru, în funcție de lungimea de undă și de temperatură.

Pirometrele al căror principiu de funcționare se bazează pe măsurarea intensității de radiație a corpului emisă la o singură lungime de undă (radiație monocromatică) se numesc piometre de radiație parțială sau optice. Deoarece diferite corpuri au diferiți coeficienți de absorbție, un pirometru optic gradat pentru un anumit corp nu poate fi utilizat pentru un altul.

c. **Metoda de măsurare a temperaturii utilizînd deplasarea maximului intensității de radiație în funcție de temperatură.** După cum se vede în figura 11-20, la creșterea temperaturii radiațiile cu energie maximă se deplasează spre domeniul lungimilor de

undă mai mici. Din această cauză, temperatura absolută a corpului se poate determina după poziția maximului; această poziție este definită de legea de deplasare a lui Wien. Considerînd că λ_m este lungimea de undă a maximului radiației, legea lui Wien se exprimă astfel:

$$\lambda_m T = 2,897 \cdot 10^3. \quad (11-15)$$

Măsurarea temperaturii prin cercetarea distribuției energiei radiante de-a lungul spectrului constituie principiul de funcționare al pirometrelor de culoare. Deoarece această metodă necesită un aparataj foarte complicat, ea a fost simplificată.

Avantajul principal al pirometrelor de radiație constă în faptul că ele măsoară temperatura fără un contact direct cu corpul a cărui temperatură se măsoară. De asemenea, pirometrele de radiație nu au o limită superioară de temperatură pînă la care pot fi utilizate. Avînd în vedere aceste avantaje cît și principiile de funcționare ale pirometrelor de radiație, pentru măsurări de precizie, în Scara internațională practică de temperatură deasupra punctului de solidificare al aurului se folosesc pirometre optice monocromatice.

2. PIROMETRE DE RADIAȚIE TOTALĂ

Acestea se bazează pe acțiunea termică a radiațiilor corpului încălzit. Construcția și etalonarea lor are la bază legea lui Ștefan Boltzman (v. relația 11-13).

Pirometrul de radiație totală este compus din două părți: o parte optică și una electrică. Partea optică are rolul de a concentra fluxul de energie ce vine de la corpul încălzit pe elementul termosensibil al părții electrice, care de obicei este un termocuplu. Pentru mărirea sensibilității, la unele pirometre cu radiație totală se folosește o baterie de termocupluri legate în serie. Lipiturile calde ale termocuplurilor sînt montate de obicei pe o placă din foiță de platină înnegrită. Astfel, pirometrul de radiație totală, prezentat în figura 11-21, are sistemul optic format dintr-un ocular 1, o oglindă concavă 2 și un sistem de oglinzi plane 3, prevăzute cu un orificiu central. Fluxul de energie radiat de sursă este concentrat de oglinda concavă pe lipiturile calde ale termocuplurilor 4. Lipiturile reci sînt montate la o distanță suficient de mare, pentru a nu fi influențate de energia concentrată. Ocularul 1 permite vizarea corpului incandescent prin orificiul central al oglinzii concave. De la termocupluri pleacă un cablu de legătură la aparatul de măsurat, care în general este un milivoltmetru. Există pirometre de radiație totală, în care aparatul de măsurat este

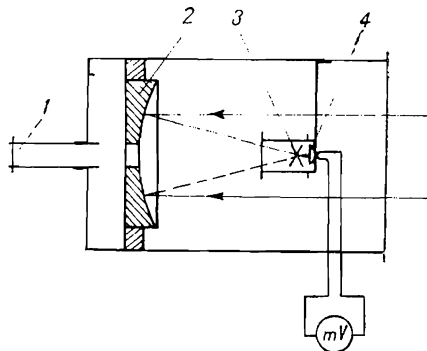


Fig. 11—21. Pirometru de radiație totală

montat în corpul instrumentului, și piometre la care aparatul de măsurat se anexează. Sistemul de oglinzi plane este compus de obicei din două oglinzi semicirculare sau dintr-o singură oglindă cu orificiul central. Pe aceste oglinzi se formează imaginea sursei a cărei temperatură se măsoară, pentru a putea fi observată în mod indirect prin ocularul 1. Oglinzile trebuie să fie confecționate dintr-un material care să permită o reflexie perfectă. În acest scop se folosesc de obicei oglinzi argintate.

La piometrele de radiație totală, erorile de măsură sînt cauzate de mediul dintre instrumentul de măsurat (piometru) și obiect (mediul absoarbe o parte din energia radiată de corpul a cărei temperatură se măsoară). O altă sursă de erori o constituie încălzirea lipiturilor reci, care trebuie menținute la o temperatură constantă. În acest scop, la unele instrumente se folosește un element termosensibil bimetalic, care este utilizat într-un sistem automat pentru compensarea variației temperaturii lipiturilor reci.

Verificarea etalonării piometrelor de radiație totală se poate realiza prin două procedee. Primul procedeu constă în vizarea unei surse de radiație termică de tip corp negru, a cărei temperatură se determină cu un aparat de măsurat etalon. Acest procedeu necesită realizarea unui corp negru și încălzirea lui uniformă. Din aceste motive se preferă al doilea procedeu, care constă în compararea indicațiilor piometrului de radiație totală cu indicațiile unui piometru de radiație etalon.

3. PIOMETRE DE RADIAȚIE PARȚIALĂ (DE STRĂLUCIRE MONOCROMATICĂ SAU „OPTICE”)

Acestea se folosesc pentru măsurarea temperaturii unei surse de radiații cu spectru restrîns. Aceste piometre sînt construite și etalonate astfel încît să respecte legea lui Planck.

Cel mai răspîndit tip de piometru de radiație parțială este cel cu filament incandescent, numit și *piometru cu dispariția filamentului*. Acest piometru este arătat în figura 11-22. Filtrul 1 este un geam absorbant cu transparență cunoscută, care este folosit pentru a se trece de la o scară gradată pentru temperaturi mici, la o scară gradată pentru temperaturi mai mari. În acest scop, piometrele de radiație parțială au anexate mai multe filtre pentru alegerea scării dorite. Obiectivul 2 este în general format dintr-o singură

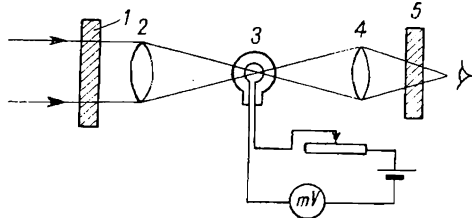


Fig. 11—22. Piometru de radiație parțială.

lentilă și are rolul de a asigura un câmp vizual uniform luminat. Pentru aceasta, filamentul becului electric 3 este montat în planul focal al lentilelor. Ocularul 4 servește pentru observarea imaginii formate în planul focal al obiectivului. Filtrul de culoare 5 lasă să treacă la ochiul observatorului numai o anumită parte din spectrul vizibil,

adică o lumină monocromatică, cu lungime de undă cunoscută. Filamentul becului electric 3 este alimentat de la o baterie de acumulatori sau pile uscate, prin intermediul unei rezistențe variabile. Cu ajutorul rezistenței variabile se modifică curentul electric, deci intensitatea de radiație a filamentului, pînă cînd aceasta coincide cu intensitatea de radiație a sursei a cărei temperatură se măsoară (se constată egalitatea prin dispariția imaginii filamentului). Aparatul de măsurat se gradează direct în $^{\circ}\text{C}$. În cazul cînd imaginea filamentului nu se mai distinge, aparatul de măsurat va indica temperatura sursei.

Piometrele de radiație parțială au dezavantajul că folosesc factorul subiectiv în procesul de măsurare, ceea ce constituie o sursă de erori și îngreuiază măsurarea rapidă a temperaturii la procese termice ce se desfășoară cu viteze mari. În această direcție s-au elaborat piometre cu celule fotoelectrice. Este cunoscut că într-o celulă fotoelectrică curentul este proporțional cu fluxul luminos emis de corpul a cărei temperatură se măsoară. Prin urmare, curentul din circuitul celulei fotoelectrice este o măsură a temperaturii și aparatul poate fi gradat în $^{\circ}\text{C}$. Materialele utilizate în confecționarea celulelor fotoelectrice (argintul, cesiul, antimoniul) au o sensibilitate selectivă, adică monocromatică.

Din punct de vedere constructiv, piometrele de radiație parțială pot avea aparatul de măsurat, sursa de alimentare și rezistența variabilă separate sau înglobate în corpul piometrului. Deoarece în cazul radiațiilor monocromatice influența surselor de erori este mai mică, piometrele de radiație parțială au o precizie mai ridicată. Pentru verificarea periodică a piometrelor optice sînt necesare surse reglabile de temperatură, între 800 și 2000 $^{\circ}\text{C}$. Cea mai simplă sursă este lampa de temperatură etalon, care se bazează pe faptul că temperatura filamentului unei lămpi cu incandescență se poate determina dacă se cunoaște curentul care trece prin filament. Aceste lămpi au o construcție specială și au certificate de etalonare în care se dau temperaturile filamentului în funcție de curentul ce trece prin filament. Verificarea piometrelor se poate efectua prin comparare cu lampa de temperatură etalon sau prin comparare cu un piometru etalon.

4. PIOMETRE DE CULOARE

Aceste piometre (bazate pe măsurarea raportului intensității radiației monocromatice la două lungimi de undă diferite) permit determinarea temperaturii unui corp pe baza culorii sale. Principiul de funcționare al acestora are la bază legea lui Wien. Valoarea obținută se apropie cel mai mult de temperatura reală, iar corecția ce trebuie făcută este mai mică și mult mai precisă decît în cazurile anterioare.

Prin temperatura de culoare a unui corp se înțelege temperatura care a fost determinată pe baza comparării culorii sale cu aceea a unui corp negru. Determinarea temperaturii de culoare se poate face prin mai multe metode,

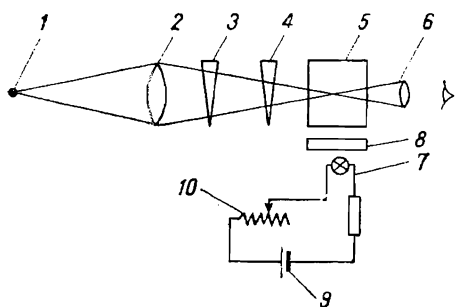


Fig. 11—23. Pirometru de culoare.

dintre care cea mai utilizată este aceea a determinării raportului între puterea de emisie a sursei studiate și puterea de emisie a corpului negru, pentru două lungimi de undă. Se folosește frecvent metoda raportului roșu-verde. În figura 11-23 este prezentată schema principală a unui pirometru de culoare. Lumina trimisă de sursa 1 a cărei temperatură trebuie măsurată trece prin obiectivul 2, prin pana bicoloră 3, prin pana cenușie 4 și cade pe planul diagonal al prisme 5 care se găsește în focalul ocularului 6. Pe același plan diagonal cade și lumina trimisă de lampa de comparație 7, după ce a trecut printr-un filtru bicolor 8. Lampa de comparație este alimentată de la o sursă de tensiune 9, prevăzută cu un reostat 10, care permite reglarea curentului prin filamentul lămpii de comparație. Pana bicoloră 3 și filtrul bicolor 8 permit să treacă numai culorile roșu și verde ale spectrului. Aceste culori se suprapun pe planul diagonal al prisme și dau o culoare albă-gălbui. Culoarea sursei studiate diferă de cea a lămpii etalon prin raportul dintre culorile roșu și verde din radiația sa. Acest raport depinde de temperatura corpului a cărui temperatură trebuie măsurată. Egalarea strălucirii sursei măsurate și a strălucirii sursei etalon se face prin deplasarea penei bicolor 4. Poziția penei bicolor, în cazul egalării celor două străluciri, indică tocmai temperatura de culoare. Pana cenușie 4 servește pentru a egala strălucirile sursei de măsurat și a sursei etalon.

Acest pirometru de culoare are dezavantajul că rezultatele obținute depind de capacitatea observatorului de a distinge culorile. Având în vedere acest dezavantaj, s-au elaborat piometre de culoare cu fotoelemente și amplificatoare de semnal, în care procesul de comparare a temperaturilor de culoare este automatizat. Din descrierea principiului de funcționare a piometrelor de culoare reiese că influența surselor de erori este redusă, ceea ce permite măsurarea cu precizie ridicată a temperaturii.

G. MONTAREA TRADUCTOARELOR DE TEMPERATURĂ

Precizia de măsurare a temperaturii depinde nu numai de precizia traductorului respectiv, ci și de montarea sa corectă. Traductorul nu trebuie să influențeze câmpul de temperatură în care este introdus. De asemenea, este necesar ca traductoarele să nu aibă o inerție termică mare, pentru a putea urmări exact variația în timp a temperaturii măsurate. Erorile care apar depind și de caracteristicile și de natura mediului a cărui temperatură se măsoară.

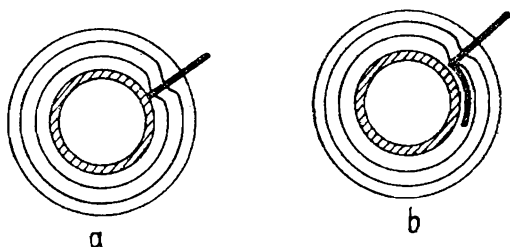
De exemplu, la măsurarea temperaturii lichidului dintr-o conductă apar erori datorită schimbului de căldură prin radiație între traductor și conductă. Pentru reducerea acestor erori, tubul de protecție al traductorului trebuie să aibă un diametru mic, iar conducta trebuie să fie izolată termic, pentru a avea aceeași temperatură cu lichidul. Aceste erori sînt mai reduse în cazul cînd în conductă curentul de lichid are o viteză mare.

O altă sursă de erori o constituie pierderile de căldură prin armătura traductorului. Deoarece temperatura vîrfului tubului de protecție diferă de temperatura peretelui pe care este fixat, apare un flux de căldură. Din cauza acestui flux de căldură temperatura traductorului va fi mai mică decît temperatura măsurată. Pentru micșorarea acestor erori traductorul trebuie să aibă o parte, de lungime mai mare, introdusă în mediul a cărui temperatură se măsoară, iar partea care se găsește în contact cu mediul exterior trebuie să fie cît mai mică sau izolată termic.

Din aceste motive, traductoarele pentru măsurarea temperaturii lichidului dintr-o conductă trebuie montate axial, pentru a se asigura o adîncime maximă de cufundare. În figura 11-6 au fost prezentate diferite metode de montare a traductoarelor de temperatură. Cînd nu este posibilă montarea axială a traductoarelor de temperatură se recomandă ca acestea să fie montate înclinat față de axa conductei. Montarea trebuie efectuată astfel încît elementul termosensibil al traductorului să se găsească pe axa conductei sau, în general, în centrul fluxului de căldură analizat.

Erorile care apar la măsurarea temperaturii corpurilor solide depind și de conductibilitatea termică a acestora. Pentru a se asigura egalizarea temperaturii corpului analizat cu cea a elementului termosensibil este necesar ca traductorul să fie de dimensiuni reduse și izolat termic de mediul exterior. De exemplu, în figura 11-24 se arată modul de montare a termocupurilor, în cazul măsurării temperaturii unei conducte izolate termic. În acest caz este corect ca lipiturile calde să fie plasate mai departe de locul unde curbele izoterme sînt deformate de conductoarele de legătură. Astfel, în figura 11-24a este prezentată o montare greșită, iar în figura 11-24b se prezintă cazul montării corecte a termocuplului.

Fig. 11—24. Montarea greșită (a) și montarea corectă (b) a unui termocuplu în cazul măsurării temperaturii unei conducte.



La măsurarea temperaturii suprafețelor se folosesc mai multe metode de fixare a termocupurilor. Lipirea sau sudarea directă a termocuplului pe materialul a cărui temperatură se măsoară are dezavantajul că schimbă caracterul suprafeței. O metodă satisfăcătoare de stabilire a contactului

dintre termocuplu și suprafața materialului este procedeul de ștemuire, dacă suprafața materialului permite. Ștemuirea constă în executarea unui orificiu în suprafața materialului a cărei temperatură trebuie măsurată, în care se introduce sudura caldă a termocuplului. Presînd materialul în jurul termocuplului, se obține un contact bun, fără a schimba caracterul suprafeței.

Piometrele de radiație permit măsurarea cu precizie a temperaturii corpurilor reale, dacă acestea au proprietăți apropiate de ale corpului negru. Din această cauză, ele se folosesc, în general, la măsurarea temperaturii în interiorul cuptoarelor. Pentru a se asigura un coeficient de absorbție (de negreală) mare, piometrele de radiație se montează în spatele unui tub din material refractar. Prin aceasta se asigură o micșorare a erorilor provocate de influența mediului dintre piometrul de radiație și corpul a cărei temperatură se măsoară.

Capitolul XII

MĂSURAREA PRESIUNILOR ȘI A DEBITELOR

A. GENERALITĂȚI

În operațiile de control și automatizare a unor procese tehnologice se impune măsurarea presiunilor și a debitelor unor lichide, gaze sau vapori.

Prin *presiune* se înțelege forța care acționează pe unitatea de suprafață. Când măsurarea presiunii se face fără a exclude influența presiunii atmosferice, se obține valoarea *presiunii absolute*. Însă, în multe cazuri este necesar să se măsoare valoarea *suprapresiunii* (adică diferența între presiunea absolută și presiunea atmosferică). De exemplu, presiunea absolută p a unui fluid este tocmai suma dintre suprapresiunea p_s și presiunea atmosferică p_a , adică:

$$p = p_s + p_a. \quad (12-1)$$

În tehnică, aparatele pentru măsurarea suprapresiunilor se numesc *manometre*. Prin urmare, întotdeauna un manometru indică diferența între presiunea absolută și cea atmosferică.

Dacă presiunea absolută este mai mică decât presiunea atmosferică, diferența lor se numește *depresiune*. Aparatele care servesc pentru măsurarea depresiunii se numesc *vacuometre*.

Unitatea de măsură a presiunii în sistemul SI este N/m^2 (newton pe metru pătrat). În practică se folosesc și următoarele unități de măsură care nu fac parte din sistemul SI: atmosfera tehnică sau, simplu, atmosfera (at) care este egală cu un kilogram forță pe centimetrul pătrat (kgf/cm^2), milimetru coloană de mercur (mm col. Hg), milimetru coloană de apă (mm col. H_2O), barul și atmosfera fizică* (At).

Un rol important în tehnică îl are și măsurarea debitelor. De exemplu, determinarea consumului de abur, aer comprimat sau de materii prime

* Prin atmosferă fizică se înțelege presiunea exercitată pe baza orizontală de o coloană de mercur cu înălțimea de 760 mm (la o accelerație normală a gravitației de $9,80665 \text{ m/s}^2$) și cu greutatea specifică de $13,5951 \text{ gf/cm}^3$ ($1 \text{ At} = 1,013250 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$).

permite ținerea unei evidențe asupra desfășurării proceselor de producție. Acest fapt are o importanță și mai mare în condițiile folosirii calculatoarelor electronice, pentru comanda proceselor tehnologice sau a unor agregate individuale.

Măsurarea debitelor în cazul lichidelor, gazelor și aburului se face cu aparate denumite *debitmetre*. Ca unități de măsură, la măsurarea debitelor se folosesc următoarele: $\text{m}^3/\text{oră}$, $\text{t}/\text{oră}$ etc. Deoarece debitmetrele influențează asupra regimului de curgere, pentru comparare se introduce noțiunea de debit caracteristic. Prin *debit caracteristic* se înțelege debitul de lichid la care pierderea de presiune a lichidului în aparatul de măsurat este 10 mm col. apă. Deoarece această pierdere de presiune este mare și inadmisibilă la majoritatea instalațiilor industriale, debitmetrele funcționează la debite mai mici decât debitul caracteristic. În majoritatea cazurilor, debitmetrele sînt formate din elementul de măsurat propriu-zis și dintr-un contor de însumare. Contoarele de însumare pot fi conectate la elementul sensibil prin transmisii electrice sau mecanice. În practică, cele mai răspîndite sînt transmisile mecanice.

În general, parametrii care caracterizează un debitmetru sînt: debitul caracteristic, diametrul de trecere a fluidului, capacitatea de înregistrare a contorului și debitul minim la care nu se depășește eroarea admisibilă.

B. MĂSURAREA PRESIUNII

1. GENERALITĂȚI

Măsurarea presiunilor este o operație care se aplică pe scară din ce în ce mai mare în tehnica modernă. Începînd de la conducte și rezervoare simple pînă la procese tehnologice automatizate, utilizarea mijloacelor pentru măsurarea presiunii constituie un factor important în urmărirea desfășurării acestor procese. Dezvoltarea mijloacelor de măsurare a presiunii a urmărit îndeaproape evoluția tehnicii. Astfel, dacă la începutul acestui secol erau uzuale presiuni de cel mult cîteva sute de kgf/cm^2 , în prezent, în unele procese tehnologice se întîlnesc presiuni ce pot ajunge pînă la mii de kgf/cm^2 . Începînd cu măsurarea vidului și terminînd cu măsurarea presiunilor foarte mari, în tehnica modernă se întîlnesc cele mai diverse tipuri de mijloace de măsurare.

Aparatele pentru măsurarea presiunii și depresiunii pot fi clasificate după destinație și după principiul de funcționare:

- după destinație există trei grupe de aparate: *etalon*, *de verificare* și *de lucru*. Aceste grupe de aparate se deosebesc prin precizia lor, prin stabilitatea în timp a parametrilor constructivi și prin gradul de influență al factorilor exteriori asupra preciziei de măsurare;

- după principiul de funcționare există următoarele tipuri de aparate pentru măsurarea presiunii: *cu lichid*, *cu arc*, *cu piston* și *electrice*.

2. MANOMETRE CU LICHID

Aceste manometre se bazează pe fenomenul de echilibrare a presiunii măsurate cu presiunea unei coloane de lichid. Aceste aparate au o construcție simplă și sînt ușor de manipulat. Din punct de vedere constructiv, manometrele cu lichid pot fi cu tub de sticlă în formă de U, cu rezervor și cu tub înclinat.

a. **Manometrul cu tub de sticlă în formă de U** (fig. 12-1) se utilizează pentru măsurarea presiunii, depresiunii și a diferențelor de presiune. Tubul de sticlă este umplut pînă la jumătate din înălțimea sa cu lichid. Pentru măsurarea presiunii este necesar să se citească diferența de nivel h dintre suprafețele libere ale lichidului de lucru. Ca lichid se folosește de obicei mercurul. La măsurări de precizie mai mică se poate folosi și apa. Dacă un tub al manometrului este montat la recipientul a cărui presiune trebuie măsurată, iar celălalt tub comunică cu atmosfera, ecuația de echilibru dintre forța exercitată de presiunea p_s și greutatea lichidului evacuat este:

$$p_s = p - p_a = h\gamma, \quad (12-2)$$

unde:

- p_s este suprapresiunea, în kgf/cm^2 ;
- p — presiunea absolută a lichidului;
- p_a — presiunea atmosferică;
- h — diferența de nivel;
- γ — greutatea specifică a lichidului.

Pentru mărirea preciziei de citire a diferenței de nivel unele manometre sînt prevăzute cu o scară cu oglindă. Dezavantajele manometrului cu tub în formă de U sînt următoarele: necesită citirea a două nivele (ceea ce poate

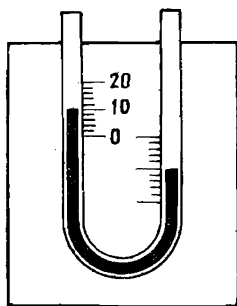


Fig. 12—1. Manometru cu tub de sticlă în formă de U.

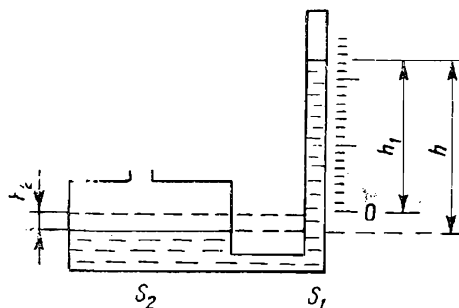


Fig. 12—2. Manometru cu rezervor.

micșora precizia de măsurare) și nu poate fi utilizat decît la presiuni relativ mari.

b. **Manometrul cu rezervor** (fig. 12-2) este format tot din două brațe, unul din brațe reprezentînd însă un vas cu secțiune mare. Presiunea de

măsurat acționează asupra suprafeței lichidului din vasul cu secțiune mare și nivelul lichidului din brațul cu secțiune mică se va ridica. Dacă se notează cu S_1 și S_2 cele două secțiuni și cu h_1 și h_2 înălțimile cu care coboară și respectiv se urcă nivelele în cele două brațe în raport cu poziția de repaus, atunci se poate scrie următoarea relație (conform legii lui Pascal):

$$S_1 h_1 = S_2 h_2. \quad (12-3)$$

Această relație exprimă faptul că volumul de lichid expulzat din primul vas este egal cu volumul de lichid, cu care se urcă nivelul în tubul subțire. Ca și la manometrele cu tub în formă de U presiunea măsurată p_s este egală cu:

$$p_s = \gamma h, \quad (12-4)$$

unde h este înălțimea coloanei corespunzătoare presiunii măsurate și este definită prin relația:

$$h = h_1 + h_2. \quad (12-5)$$

Din această relație reiese că pentru a măsura o presiune dintr-o singură citire a înălțimii h_1 , este necesar ca înălțimea h_2 cu care coboară nivelul lichidului în vasul cu secțiune mare să fie neglijabilă. Pentru ca eroarea de măsurare a presiunii dintr-o singură citire să fie mică, este necesar ca diametrul vasului să fie mult mai mare decât diametrul tubului (de obicei se ia mai mare de cel puțin 10 ori).

c. Manometrul cu tub înclinat. La măsurarea unor presiuni sau depresiuni mici, în vederea reducerii erorilor de citire, se utilizează aparate cu dispozitive optice speciale (cu lentile) sau manometre cu tub înclinat. La măsurări ce necesită o citire rapidă, aparatele cu dispozitive optice sînt incommode, din care cauză se utilizează manometrul cu tub înclinat, numit uneori și micromanometru (fig. 12-3). Recipientul a cărui presiune trebuie măsurată se racordează la vasul larg. În cazul măsurării depresiunilor recipientul se conectează la tubul înclinat. La măsurarea unor diferențe de presiune, recipientul avînd presiunea mai mică se racordează de asemenea la tubul înclinat. Este evident că pentru aceeași lungime a tubului înclinat presiunea limită ce se poate măsura depinde de unghiul de înclinare α . Cu cît unghiul de înclinare este mai mic, cu atît va fi mai mică presiunea maximă ce se poate măsura. Scara manometrelor cu tub înclinat se gradează în milimetri coloană de lichid de lucru.

De obicei, precizia de măsurare este cuprinsă între 0,5% și 1,5%. Acest

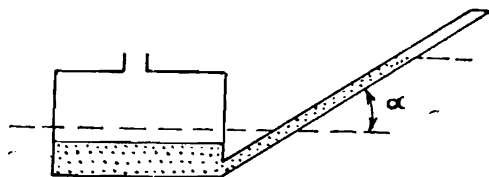


Fig. 12—3. Manometru cu tub înclinat.

manometru se folosește și pentru măsurarea presiunilor mici, din care cauză a fost numit micromanometru. Intervalul de presiune se alege fixînd o anumită înclinare a unghiului α .

Măsurarea presiunii cu ajutorul manometrelor cu lichid este însoțită de erori condiționate de influența

temperaturii mediului exterior și de accelerația gravitației. Măsura presiunii este înălțimea coloanei de lichid exprimată în milimetri coloană de mercur sau de alt lichid la o anumită temperatură și accelerație a gravitației. Însă, în realitate, măsurările pot avea loc în condiții diferite și prin urmare apar erori. Un alt dezavantaj care limitează utilizarea manometrelor cu lichid îl constituie faptul că au dimensiuni relativ mari și nu sînt portabile. Din această cauză, aceste manometre sînt utilizate exclusiv în laboratoare.

3. MANOMETRE CU ARC

Aceste manometre se bazează pe deformarea unor elemente elastice sub influența presiunii. Aceste aparate sînt folosite într-un interval mare de presiuni: de la miimi de kgf/cm^2 pînă la mii de kgf/cm^2 . Datorită faptului că manometrele cu arc sînt simple, portabile, și au un preț de cost redus, ele sînt utilizate atît în laboratoare cît și în industrie. Ca elemente elastice se folosesc membrane, burdufuri și arcuri tubulare, îndoite sub formă de arc de cerc sau de curbă helicoidală.

Materialele utilizate pentru confecționarea elementelor elastice trebuie să posede o mare elasticitate, o stabilitate în timp a parametrilor și o rezistență mecanică corespunzătoare. Aceste caracteristici ale materialelor pot fi analizate numai pe baza diagramei tensiune-deformație. În figura 12-4 este prezentată o curbă caracteristică de deformație la întindere. Limita de proporționalitate σ_p definește cea mai mare tensiune la care se respectă legea lui Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (12-6)$$

unde E este modulul de elasticitate, iar ε deformația.

O altă proprietate mecanică a materialului este limita de curgere σ_c , care se caracterizează prin faptul că la o creștere mică a tensiunii (întinderii) crește rapid deformația plastică. Cînd se depășește limita de curgere a materialului apar deformații remanente, care modifică forma elementului elastic. Dacă se continuă creșterea tensiunii, deformațiile cresc rapid și materialul se distruge cînd se atinge tensiunea de rupere σ_r .

Deși curba de deformație este o caracteristică importantă, la determinarea proprietăților elastice trebuie să se ia în considerare și limita de rezistență la oboseală. Limita de rezistență la oboseală a unui arc depinde de materialul din care este confecționat, de starea suprafeței și, în special, de caracterul variației tensiunilor în timp. De obicei, elementele elastice se încearcă prin solicitări variabile. Astfel, este cunoscut că un element elastic poate funcționa timp îndelungat la tensiuni destul de mari dar constante, însă se poate distruge repede sub influența unor tensiuni variabile mici.

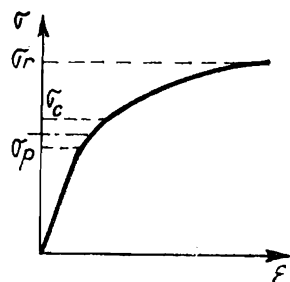


Fig. 12-4. Diagrama tensiune — deformație.

a. **Manometrele cu membrană** sînt utilizate pentru măsurarea presiunii într-un interval de la $0,2 \text{ kgf/cm}^2$ pînă la 30 kgf/cm^2 . Aceste manometre sînt formate dintr-o membrană ondulată (identică cu cea din figura 12-7), care este strînsă între două flanșe (membranele sînt ondulate pentru a se reduce rigiditatea, adică pentru creșterea deformării sub acțiunea presiunii și, prin urmare, pentru creșterea sensibilității), precum și dintr-o tijă fixată cu un capăt de membrană și care antrenează un sector sau un sistem de roți dințate ce transmit deplasarea unui ac indicator. Sub acțiunea presiunii, membrana ondulată se încovoiește; deplasarea membranei este transmisă acului indicator prin intermediul tijei, sectorului dințat și al roților dințate. Deoarece deplasarea membranei este mică ($1,5\text{--}2 \text{ mm}$), mecanismul de transmitere are și rolul de a amplifica deplasarea inițială. Intervalul de presiuni în care se folosește manometrul cu membrană depinde de materialul și dimensiunile membranei. Astfel, presiunea maximă care poate fi măsurată cu ajutorul unui manometru cu membrană este înscrisă pe scara acestuia; această presiune nu trebuie să provoace deformări neelastice.

b. **Manometrele cu burduf elastic** se folosesc la măsurarea presiunilor cuprinse între $0,5$ și 5 kgf/cm^2 . La aceste manometre, elementul elastic este un arc în formă de burduf (fig. 12-5). Deplasarea capătului liber al burdufului este direct proporțională cu presiunea aplicată și se transmite unui ac indicator.

c. **Manometrele cu arc tubular** sînt cele mai folosite în măsurările de laborator și în industrie. Așa cum s-a mai arătat (la descrierea termometrelor manometrice), arcu tubular 7 reprezintă un tub gol în interior, cu secțiunea ovală sau eliptică și îndoit în formă de arc de cerc. Capătul liber

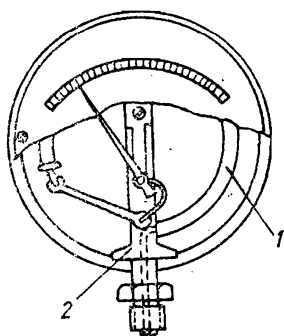


Fig. 12—5. Manometru cu burduf elastic.

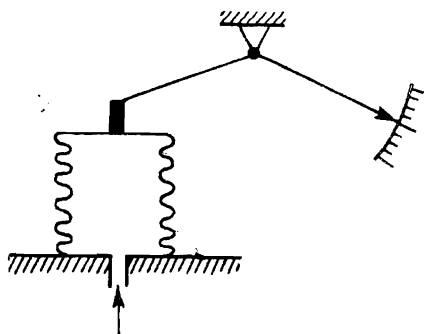


Fig. 12—6. Manometru cu arc tubular.

al elementului elastic (fig. 12-6) este legat de o tijă, care printr-un mecanism cu roți dințate sau cu pîrghii transmite o mișcare de rotație acului indicator. Celălalt capăt al elementului elastic este montat pe suportul aparatului 2, de unde se face legătura cu recipientul a cărui presiune trebuie măsurată. Când presiunea crește, capătul liber al elementului elastic se deplasează și devierea acului indicator este proporțională cu presiunea măsurată.

Pentru mărirea sensibilității manometrelor cu arc tubular se folosesc arcuri tubulare eliocoidale, cu acestea obținându-se un unghi mai mare de răsucire a capătului liber. Secțiunea tubului este necirculară, însă simetrică. Materialul din care este confecționat arcul tubular se alege în funcție de intervalul de presiune necesar a fi măsurat. Astfel, pentru presiuni între 0 și 160 kgf/cm² se folosește alama, iar pentru presiuni mai înalte se folosește oțelul (conform tensiunilor σ_p , σ_c , σ_r ale materialului — v. fig. 12-4).

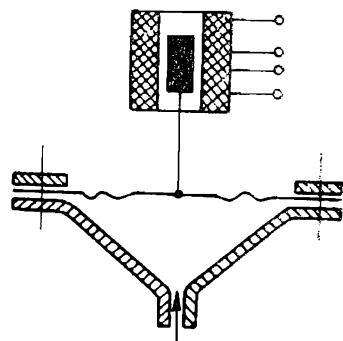


Fig. 12—7. Traductor inductiv de presiune.

Principiile care stau la baza construcției manometrelor cu arc se aplică și în construcția unor traductoare de presiune. Astfel, în figura 12—7, este prezentat un traductor inductiv de presiune. Deplasarea membranei este transmisă prin intermediul unei tije la un miez de fier. Când presiunea crește, deplasarea membranei duce la o schimbare a poziției miezului de fier și prin urmare va avea loc o variație a impedanței bobinei. Variația impedanței bobinei este proporțională cu presiunea. Cele două înfășurări ale bobinei se plasează în două brațe alăturate ale unei punți electrice alimentată în curent alternativ (apare efectul diferențial în brațul detector al punții). Pentru o presiune egală cu zero, puntea este echilibrată. Când presiunea crește, variază impedanța celor două înfășurări ale bobinei și puntea se dezechilibrează. Tensiunea de dezechilibru a punții reprezintă un semnal electric (proporțional cu presiunea măsurată), care poate fi transmis la un adaptor.

4. MANOMETRE CU PISTON

Aceste manometre sînt construite pe principiul echilibrării forței create de presiunea ce trebuie măsurată cu forța creată de un piston pe care pot fi așezate greutăți. Deoarece acest tip de manometre este complicat din punct de vedere constructiv, ele sînt utilizate numai în laboratoare, la verificarea manometrelor de alte tipuri. Cu ajutorul manometrelor cu piston și greutăți se acoperă domeniul de măsurare a presiunii de la limita inferioară (aproape de zero) pînă la valori care ating limita de 10 000 kgf/cm². Manometrele bazate pe același principiu, însă cu o construcție specială ce asigură o înaltă etanșeitate, pot măsura presiuni pînă la valori mult mai mari. Diferitele tipuri de manometre cu piston și greutăți diferă prin: forma pistonului, modul de etanșare a sistemului, forța de echilibrare etc.

5. MANOMETRE ELECTRICE

Manometrele electrice reprezintă dispozitive moderne pentru măsurarea presiunii și au mari perspective de utilizare. Aceste aparate de măsurat sînt utilizate în special pentru măsurarea presiunilor foarte mari și foarte

mici. Principiul de funcționare al manometrelor electrice se bazează pe diferite fenomene fizice care au loc sub acțiunea presiunii exterioare. Semnalul electric în care este convertită presiunea poate fi transmis la un aparat indicator sau la un adaptor utilizat într-un sistem automat.

a. **Manometre piezoelectrice.** Funcționarea acestora se bazează pe utilizarea efectului piezoelectric, care constă în apariția unor sarcini electrice pe suprafața unor cristale atunci când acestea sînt supuse la presiune. Cristalele utilizate în acest scop trebuie să aibă o rezistență mecanică mare, să nu fie higroscopice și să nu aibă proprietăți dependente de temperatură într-un interval de temperatură cît mai mare. Aceste condiții sînt îndeplinite de cristalele de cuarț (SiO_2 : bioxid de siliciu). În acest scop, din cristale de cuarț se decupează plăcuțe dreptunghiulare cu fețele paralele la axele acestuia. Sarcina electrică care apare pe suprafața unei plăcuțe este proporțională cu presiunea normală pe suprafață și cu mărimea suprafeței. Creșterea dimensiunilor unei plăcuțe este limitată de scăderea rezistenței mecanice a acesteia. Din această cauză, de obicei se folosesc mai multe plăcuțe de cristal suprapuse. În figura 12-8 este arătat un sistem din două plăcuțe dintr-un cristal de cuarț, folosit pentru măsurarea presiunii. Dacă tensiunea obținută la bornele *a*, *b* este amplificată cu ajutorul unui amplificator electronic, semnalul la ieșirea acestuia va fi proporțional cu presiunea. Prin urmare, elementul descris reprezintă un traductor piezoelectric de presiune. Dacă tensiunea de la ieșirea amplificatorului se măsoară cu un aparat de măsurat, montajul devine un aparat indicator de presiune (manometru piezoelectric).

b. **Traductoare rezistive și capacitive de presiune.** Pentru măsurarea presiunilor mari se utilizează și fenomenele de variație a rezistenței electrice a unor materiale sau a capacității unui condensator cu creșterea presiunii.

— La unele materiale, rezistența electrică depinde în mod liniar de presiunea exterioară într-un interval suficient de mare (de la 10^3 pînă la $4 \cdot 10^4 \text{ kgf/cm}^2$). La acest tip de traductoare, presiunea este convertită într-o rezistență, din care cauză se mai numesc și traductoare rezistive. Tot din categoria traductoarelor rezistive fac parte și traductoarele tensometrice. Un tensometru se confecționează dintr-o sîrmă de diametru 0,02 mm sau o bandă subțire fixată cu clei pe un suport (fig. 12-9). Suportul se alege în funcție

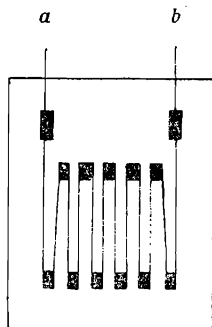


Fig. 12—8. Traductor piezoelectric de presiune.

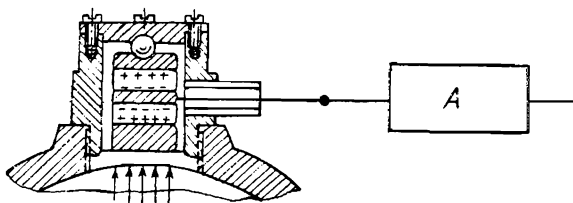


Fig. 12—9. Traductor tensometric.

de temperatura mediului exterior și poate fi confecționat din hîrtie (pînă la 70°C), din material plastic (pînă la 200°C) și din azbest (pînă la 400°C). În vederea măsurării presiunii suportul se lipește pe corpul recipientului, unde trebuie măsurată presiunea. Cînd presiunea crește, se modifică secțiunea firului tensometric, deci și rezistența lui electrică. Pentru citirea valorii presiunii, atunci cînd se utilizează un convertor rezistiv se folosește o punte Wheatstone, care se dezechilibrează atunci cînd se schimbă valoarea rezistenței.

— La traductoarele capacitive de presiune, modificarea presiunii de măsurat are ca efect variația capacității unui condensator, care este utilizat pentru obținerea unui semnal electric. Condensatoarele au de obicei două plăci paralele, separate între ele prin aer sau printr-un dielectric oarecare. Deoarece capacitatea unui condensator depinde de suprafața plăcilor, de distanța între ele și de grosimea dielectricului, orice variație a unuia dintre acești parametri duce la o variație a capacității. Dacă variația unuia dintre acești parametri este determinată de presiunea de măsurat, atunci valoarea capacității condensatorului sau a unui semnal electric în care este aceasta convertită se poate grada direct în unități de măsură a presiunii. De obicei, la traductoarele capacitive de presiune parametrul care se schimbă este distanța între plăci. Astfel, o placă este fixă, iar cealaltă este elastică și în contact direct cu mediul, a cărui presiune trebuie măsurată. Cînd presiunea crește, distanța dintre cele două plăci se micșorează, ceea ce provoacă o variație a capacității. La acest tip de traductoare capacitive deplasarea plăcii elastice este de zecimi de milimetru. Principalele avantaje ale traductoarelor capacitive constau în faptul că au dimensiuni reduse și rezistă la vibrații. Domeniul lor de utilizare este de la 0 pînă la $1\,000\text{ kgf/cm}^2$. Pentru convertirea capacității într-un semnal electric, condensatorul este montat într-un circuit de rezonanță alimentat de la un oscilator de înaltă frecvență. După amplificare și redresare, semnalul electric rezultat este proporțional cu presiunea. Ansamblul format din oscilator, amplificator și redresor reprezintă un adaptor.

c. **Manometre de ionizare (joje de ionizare).** Pentru măsurarea presiunilor foarte mici se pot utiliza manometrele cu lichid și unele manometre speciale, dintre care se vor analiza manometrele de ionizare. Principiul de funcționare al acestora se bazează pe dependența ionizării gazului a cărui presiune se măsoară de presiunea lui. Gazul a cărui presiune trebuie măsurată se introduce într-un tub asemănător tuburilor electronice cu trei electrozi, cu încălzire directă, reprezentat schematic în figura 12-10 (într-un balon de sticlă sau metalic sînt introduse un filament de wolfram, o grilă și un anod). Între anod și catod se fixează o diferență de potențial, care trebuie să depășească potențialul de ionizare al gazului din tub (pentru colectarea ionilor pozitivi se introduce electrodul numit grilă, care se găsește la o tensiune negativă).

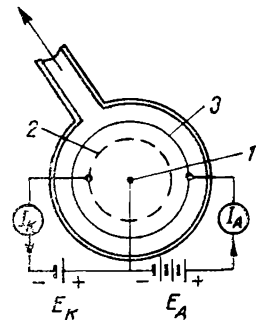


Fig. 12—10. Măsurarea presiunilor foarte mici prin metoda ionizării.

În funcție de modul în care se face conexiunea, grila și anodul pot avea roluri diferite. Electronii emiși de catodul 1 sînt atrași de anodul 3, care este la o tensiune pozitivă (fig. 12-10). Electronii, în drumul lor spre anod, ionizează un număr mai mare sau mai mic de molecule, în funcție de presiunea gazului. Ionii formați sînt culeși de electrodul colector 2 (grila), constituind un curent I care este proporțional cu curentul anodic I_a al tubului și cu presiunea p a gazului, adică:

$$I = CpI_a, \quad (12-7)$$

unde C este o constantă de proporționalitate. Presiunea p se deduce din relația (12-7) $\left(p = \frac{I}{CI_a}\right)$.

O problemă foarte importantă în folosirea manometrelor de ionizare este degazarea. Astfel, dacă recipientul și electrozii nu sînt bine degazați înainte de începerea măsurărilor, gazele ce se degajă din aceste piese deformează indicațiile manometrului. Pentru degazare catodul este încălzit pînă la incandescență, grila se bombardează cu electroni, iar recipientul se încălzește într-un cuptor. Necesitatea încălzirii prealabile a pieselor constituie dezavantajul principal al manometrelor de ionizare. Deoarece indicațiile manometrelor de ionizare depind de natura gazului a cărui presiune trebuie măsurată, gradarea acestora este valabilă numai pentru gazul respectiv. Gradarea acestor manometre se face prin confruntarea indicațiilor lor cu cele ale unui manometru etalon.

Semnalul electric poate fi transmis la un adaptor, utilizat într-un sistem automat.

C. MĂSURAREA DEBITELOR

1. GENERALITĂȚI

În tehnica modernă, problema măsurării debitelor fluidelor (lichide, aburi, gaze) are o mare importanță pentru stabilirea indicilor de funcționare ai diferitelor agregate. Fluide în mișcare printr-o conductă se întîlnesc în toate ramurile tehnicii. La toate procesele de ardere, la instalațiile hidraulice de comandă, în instalațiile de răcire etc. se găsește ca element principal sau accesoriu cel puțin un fluid care se deplasează printr-o conductă. Prin urmare, măsurarea cu mare precizie a debitului are o mare importanță economică, deoarece prin aceasta se cunoaște cît consumă sau cît produce o instalație, ceea ce constituie și un factor pentru mărirea siguranței de funcționare.

Debitul fluidelor se poate măsura ca debit de volum Q_v sau ca debit de masă Q_m . Între aceste mărimi este valabilă următoarea relație:

$$Q_m = \rho Q_v, \quad (12-8)$$

unde ρ este densitatea fluidului.

Pentru măsurarea cantității de substanță care se scurge în unitatea de timp printr-o secțiune se folosesc diferite metode, bazate pe măsurarea vitezei fluidului, a volumului acestuia, a presiunii dinamice, a căderii de presiune prin laminare, precum și metode bazate pe echilibrul de forțe.

2. DEBITMETRE DE VITEZĂ

Aceste debitmetre sînt formate dintr-un rotor care este montat în conductă unde se efectuează măsurarea debitului. Debitmetrele de viteză pot fi cu paletaj vertical (fig. 12-11) sau spiral. Curentul de fluid din conductă exercită o presiune asupra rotorului, care se învîrtește cu o viteză proporțională cu viteza fluidului. Prin urmare, debitul măsurat va depinde de viteza de rotație V a rotorului, adică:

$$Q_v = CV, \quad (12-9)$$

unde C este o constantă de proporționalitate.

În general, rotorul debitmetrului este legat printr-un angrenaj cu melc de un mecanism de transmitere, care deplasează un ac indicator sau un sistem de contorizare (înregistrare). Materialele din care se confecționează rotoarele depind de temperatura și de acțiunea chimică a fluidului măsurat. La temperaturi joase se folosesc materiale plastice, iar la temperaturi înalte, metale.

În ultimul timp, pentru măsurări de înaltă precizie se utilizează debitmetrele cu rotor spiral. În acest scop, rotorul se confecționează dintr-un material magnetic și se montează într-o porțiune de conductă nemagnetică. Așa cum se vede în figura 12-12, în bobina 1, care este montată pe conductă,

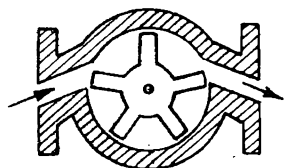


Fig. 12-11. Debitmetru de viteză cu paletaj vertical.

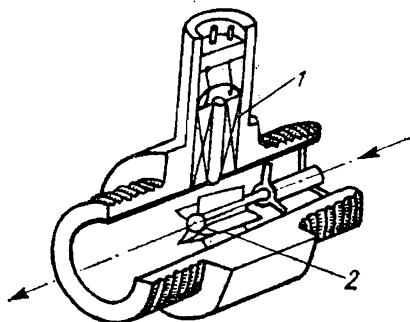


Fig. 12-12. Debitmetru de viteză cu rotor spiral.

se induce o tensiune electromotoare. Numărul de impulsuri induse depinde de viteza de rotație a rotorului spiral 2. Pentru măsurarea debitului se înregistrează numărul de impulsuri în unitatea de timp. Operația de înregistrare se efectuează cu dispozitive electronice de calcul (numărătoare binare).

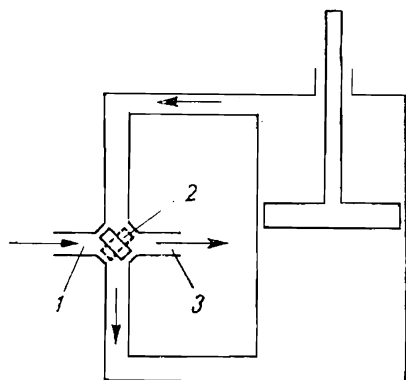


Fig. 12—13. Debitmetru cu piston.

3. DEBITMETRE VOLUMICE

Funcționarea acestora se bazează pe măsurarea numărului de umpleri ale unui anumit volum de lichid. În funcție de organul care efectuează umplerea volumului există debitmetre cu piston și debitmetre cu roți dințate.

a. **Debitmetrul cu piston** (fig. 12-13) este compus dintr-un cilindru care se umple cu lichid și un distribuitor 2 cu patru căi. Lichidul intră pe conducta 1 și, prin distribuitorul cu patru căi, intră sub piston, pe care tinde să-l ridice. Când pistonul se deplasează în sus, lichidul din partea superioară este transmis la ieșirea 3. La atingerea poziției superioare a pistonului un mecanism (neprezentat în figură) schimbă poziția distribuitorului și ciclul se repetă. Debitmetrele cu piston au o precizie de $\pm 1\%$ și se folosesc și pentru fluide la temperaturi înalte.

b. **Debitmetrul cu roți dințate** se bazează pe același principiu și conține în general două roți ovale 1, 2 (fig. 12-14) sau de alte profile. Curentul de fluid exercită o presiune asupra roților dințate, astfel încât rolul de conducere se schimbă după fiecare sfert de rotație. Această schimbare este determinată de raportul de forțe exercitate de curentul de fluid asupra suprafețelor roților dințate. Forțele creează un moment de rotație (la roata care conduce) sau un moment rezistent (la roata condusă). În poziția I, roata dințată 1 este acționată de o forță nesimetrică, iar roata dințată 2, de o forță simetrică,

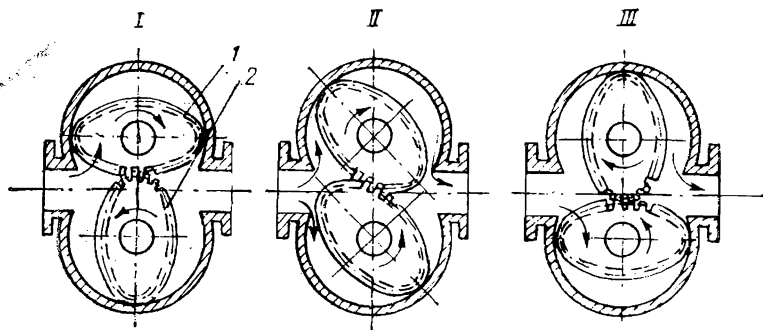


Fig. 12—14. Debitmetru cu roți dințate.

a cărei rezultantă trece prin axa ei. Prin urmare, în poziția I, roata dințată 1 va roti roata dințată 2, trecând prin poziția II în poziția III. În poziția III, rolul roților dințate se inversează. O dată cu rotirea roților dințate de către fluidul sub presiune, în conducta de ieșire sint transmise cantitățile

de lichid limitate de corpul debitmetrului și de profilul roților dințate. În pozițiile *II* și *III*, acest volum este situat în partea inferioară. Numărul de rotații se transmite la un mecanism de înregistrare gradat în unități de debit. Contoarele volumice cu piston și cu roți ovale asigură o precizie de 0,5—1,5% (în cazul gazelor precizia este mai mică, ajungând pînă la 2,5%).

Deși asigură o precizie ridicată, debitmetrele volumice prezintă în schimb următoarele dezavantaje: produc o pierdere însemnată de presiune, iar la măsurarea fluidelor corosive pot fi utilizate numai cu amenajări speciale. În cazul măsurării debitelor mari, aparatele de acest tip au gabarite mari și un preț de cost ridicat, ceea ce limitează utilizarea lor.

4. TUBURI PNEUMOMETRICE

Acestea se bazează pe măsurarea presiunii dinamice a unui fluid, care se află în relație de directă proporționalitate cu debitul. Presiunea dinamică este egală cu diferența dintre presiunea totală și presiunea statică a fluidului. Presiunea totală se măsoară cu ajutorul unui tub deschis, montat după cum se vede în figura 12-15 contra sensului de curgere a fluidului. Presiunea statică se măsoară cu un tub introdus printr-un orificiu în peretele conductei. Măsurarea presiunii dinamice, adică a diferenței celor două presiuni (totală și statică), se face cu ajutorul unui manometru, care poate fi gradat direct în unități de măsură pentru debit. Pentru a ușura operațiile de montare și exploatare s-au construit tuburi pneumometrice, în care cele două tuburi pentru măsurarea presiunii statice și a presiunii totale sînt legate împreună.

Pentru confecționarea tuburilor pneumometrice se utilizează diferite materiale. Tuburile de presiune confecționate din cupru se pot utiliza pentru fluide a căror temperatură nu depășește 400°C, iar cele din oțel, pentru fluide a căror temperatură este de maximum 800°C. Uneori, pentru măsurarea debitelor unor fluide la temperaturi înalte se recomandă folosirea tuburilor răcite cu apă. Tuburile de presiune (pneumometrice) au avantajul că au o pierdere mică de presiune, sînt simple și pot fi utilizate pentru un domeniu larg al diametrelor conductelor. Ca dezavantaj se poate menționa faptul că necesită un volum mare de calcule și că nu se pot utiliza în cazul fluidelor cu impurități.

Presiunea dinamică poate fi măsurată și cu ajutorul unui traductor inductiv. Pentru aceasta, presiunea totală și presiunea statică a fluidului acționează asupra celor două fețe ale unei membrane, de care este legat un miez de fier (v. fig.12-7).

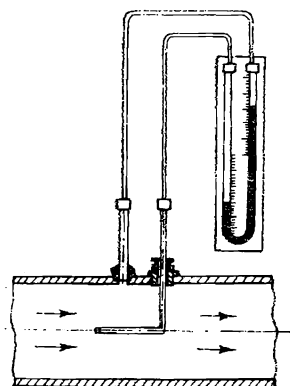


Fig. 12—15. Tub pneumometric.

5. DEBITMETRE CU DISPOZITIVE DE STRANGULARE

Cea mai răspândită metodă pentru măsurarea debitelor se bazează pe măsurarea căderii de presiune. Această metodă se folosește într-un interval mare de temperatură și presiune a lichidelor și gazelor. Pentru utilizarea acestei metode este necesar ca lichidele să nu conțină aburi, gaze, sau să nu se sedimenteze, iar gazele să nu conțină particule mari în suspensie. Un dispozitiv de strangulare cu diafragmă (fig. 12-16) creează în conductă o îngustare locală. Din această cauză, lichidul sau gazul va avea o viteză mai mare în secțiunea îngustată. Creșterea vitezei duce la o scădere a presiunii statice în secțiunea îngustată. Prin urmare, principiul de măsurare a debitului cu ajutorul diafrazelor constă în schimbarea parțială a energiei potențiale a fluidului în energie cinetică. Această transformare de energie se manifestă tocmai prin mărirea vitezei și prin scăderea concomitentă a presiunii statice a fluidelor. Deci, la trecerea printr-un dispozitiv de strangulare se creează o cădere de presiune ce depinde de viteza lichidului sau a gazului.

Ca dispozitive de strangulare se folosesc diafragme, ajutaje și tuburi Venturi. Așa cum se vede în figura 12-17, *a*, diafragma, care este cel mai des utilizată, reprezintă un disc subțire cu o gaură circulară cu centrul pe axa conductei. Îngustarea curentului fluidului datorită diafragmei începe înaintea acesteia și are secțiunea minimă după diafragmă. Așa cum reiese din figura 12-16, după diafragmă presiunea fluidului p_1 nu se mai restabilește complet. Această pierdere de presiune Δp se datorește apariției unor zone de vârtejuri.

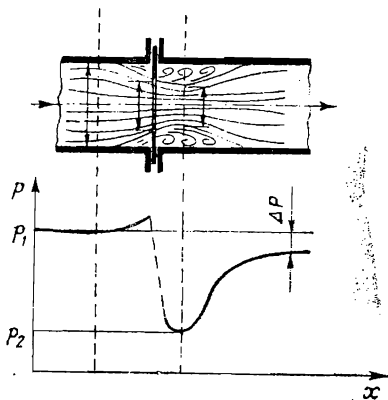


Fig. 12-16. Dispozitiv de strangulare cu diafragmă.

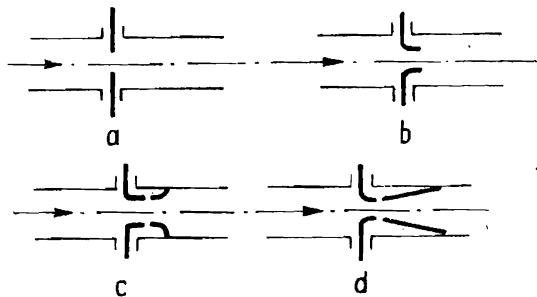


Fig. 12-17. Dispozitive de strangulare.

Spre deosebire de diafragmă ajutajele (fig. 12-17 *b, c*) au o parte profilată, ceea ce permite reducerea vârtejurilor. Tubul Venturi, reprezentat în figura 12-17 *d*, are o parte profilată analogă cu ajutajele, după care urmează o parte divergentă numită difuzor. Datorită acestei forme, tubul Venturi creează,

zone mici de vârtejuri și căderea de presiune este mică. La aceste aparate, debitul poate fi calculat cu ajutorul formulei:

$$Q_m = K \sqrt{p_1 - p_2}, \quad (12-10)$$

unde:

$p_1 - p_2$ este căderea de presiune la trecerea curentului de fluid prin zona de strangulare (fig. 12-16);

K — un coeficient ce depinde de natura fluidului, de geometria strângurii și altele.

Măsurarea presiunii înainte și după dispozitivul de strangulare se face prin orificii la care sînt conectate tuburi de legătură care merg la aparatul de măsurat. Ca aparate de măsurat se folosesc manometrele diferențiale cu lichid sau cu arc (elemente elastice). Pierderile de presiune în aceleași condiții de debit și diferență de presiune la diafragmă și ajutoraj sînt aproape egale. La tuburile Venturi pierderile sînt mult mai mici. De aici rezultă că în anumite cazuri se impune montarea tuburilor Venturi. De exemplu, în conductele de ieșire la uzinele de apă la fluide cu viteze mari și temperaturi ridicate (aburi supraîncălziți) muchia ascuțită a diafragmei se tocește repede, din care motiv se recomandă folosirea tuburilor Venturi. Montarea dispozitivelor de strangulare se face de obicei între două flanșe ale conductei. Orificiul de strangulare trebuie să fie bine centrat, iar diametrul conductei trebuie să fie constant pe o anumită lungime, neadmițîndu-se suduri. Fluidul trebuie să ocupe toată secțiunea conductei și a dispozitivului de strangulare, iar curgerea să fie pe cît posibil staționară, adică să nu se producă în timp variații rapide ale vitezelor de scurgere la locul de măsurare.

Măsurarea debitului pe baza căderii de presiune din dispozitivele de strangulare oferă avantajul unei construcții simple și a unui preț de cost redus al dispozitivului de măsurat, care este robust și poate fi utilizat pentru o gamă largă de debite. În schimb, această metodă de măsurare are dezavantajul că necesită o parte rectilinie a conductei mult mai mare decît în cazul celorlalte metode, necesită un dispozitiv de calcul care să extragă radicalul din diferența presiunilor (înainte și după laminare, deci o sursă de erori), iar uzura muchiilor dispozitivului de strangulare duce de asemenea la creșterea erorilor.

6. ROTAMETRE

Rotametrele se construiesc pe principiul echilibrării forțelor exercitate de un curent de fluid asupra unui corp în suspensie. În figura 12-18 este prezentat un rotametrul, care este format dintr-un tub conic vertical din sticlă 1, în interiorul căruia se află un plutitor 2. Diametrul plutitorului este mai mic decît cel al tubului conic, care este fixat cu capătul mai larg în sus. Plutitorul are în partea superioară o serie de creștături. Sub influența curentului de aer care trece prin creștături, flotorul va căpăta o mișcare de rotație, datorită căreia se va plasa în mijlocul curentului de aer. Flotorul este în

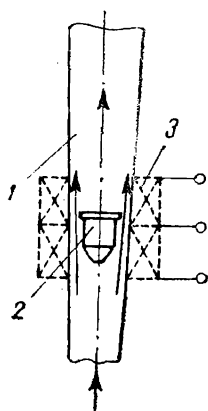


Fig. 12—18. Rotametrul (schemă de principiu).

echilibru atunci când greutatea sa este echilibrată de forța creată de presiunea curentului. O dată cu ridicarea flotorului crește interstițiul inelar între plutitor și suprafața interioară a tubului și deci forța exercitată de curentul de aer va scădea. Forța care tinde să ridice flotorul este egală cu produsul între diferența dintre presiunea p_1 dinaintea flotorului și presiunea p_2 după flotor, precum și suprafața S a secțiunii flotorului, adică:

$$F_1 = S(p_1 - p_2). \quad (12-11)$$

Forța F_2 dirijată de sus în jos este egală cu diferența dintre greutatea flotorului și greutatea fluidului dislocuit, adică:

$$F_2 = V(\gamma_1 - \gamma_2), \quad (12-12)$$

unde γ_1 și γ_2 reprezintă greutatea specifică a flotorului și a lichidului care trece prin tub, iar V este volumul flotorului. La echilibrul acestor două forțe ($F_1 = F_2$) flotorul va fi în repaus, iar deplasarea sa va depinde de valoarea debitului practic liniar. Prin urmare, poziția flotorului poate fi gradată în unități de debit.

Rotametrele numite uneori și debitmetre cu secțiune variabilă se utilizează atunci când se cere numai o măsurare relativă (nu foarte precisă) a debitului. Alegerea tipului de rotametrul depinde de caracteristicile fluidului. Astfel, greutatea specifică a fluidului influențează asupra alegerii greutății flotorului. Viscositatea fluidului condiționează alegerea formei flotorului, iar condițiile chimice condiționează natura materialului utilizat. Ca traductor electric de ieșire al rotametrului din figura 12-18 se folosește un traductor inductiv 3, al cărui miez mobil este constituit chiar de flotorul 2 din interiorul tubului 1. Deplasînd bobina 3 de-a lungul tubului se poate regla traductorul pentru sesizarea variațiilor debitului în jurul oricărei valori de referință.

7. DEBITMETRE ELECTROMAGNETICE

Pentru măsurarea debitelor electrolitilor (acizi, soluții de săruri etc.) se folosesc debitmetre electromagnetice (fig. 12-19). Lichidul din conductă 1, confecționată din material electroizolant, trece printre poli electromagnetului 2. În circuitul electro-

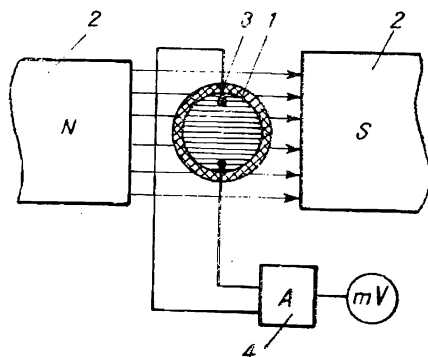


Fig. 12—19. Debitmetru electromagnetic-

zilor 3 se induce o tensiune electromotoare direct proporțională cu viteza medie a electrolitului, care se poate asimila cu un conductor ce se deplasează într-un câmp magnetic.

Tensiunea electromotoare indusă e are expresia:

$$e = CBvd, \quad (12-13)$$

unde:

C este o constantă de proporționalitate;

B — inducția magnetică;

d — diametrul interior al conductei;

v — viteza fluidului.

Prin urmare, valoarea tensiunii electromotoare este direct proporțională cu viteza, deci în cazul aparatului analizat, cu debitul fluidului. Acest lucru este valabil în următoarele ipoteze: conductivitatea electrică a conductei este neglijabilă în raport cu cea a fluidului; proprietățile electrice ale fluidului sînt omogene; câmpul magnetic este uniform.

Această metodă are avantajul că nu conține piese în mișcare, iar variațiile temperaturii au o influență redusă. Dacă se folosește un câmp electromagnetic alternativ, atunci tensiunea indusă va fi alternativă. În acest caz, elementul 4 este un amplificator de curent alternativ, cu ieșirea conectată la un aparat de măsurat gradat în unități de debit sau la un adaptor utilizat într-un sistem automat. Acest tip de debitmetru are avantajul că poate fi utilizat și în cazul lichidelor corosive. Principalul dezavantaj al acestei metode îl constituie faptul că nu este utilizabilă pentru măsurarea debitelor de gaze și lichide cu conductivitate electrică mică. Pentru a extinde limita de aplicabilitate a metodei și la lichide cu conductivitate redusă, în prezent se studiază mărirea conductivității prin ionizare prealabilă. Deși această metodă necesită o aparatură complexă, siguranța mare în funcționare conferă metodei mari avantaje, care îi asigură în viitor o largă utilizare.

8. DEBITMETRE CU ULTRASUNETE

O mare răspîndire au debitmetrele pentru lichide bazate pe utilizarea ultrasunetelor. Vibratorul, adică sursa de ultrasunete are o poziție fixă. Viteza ultrasunetelor c se adună cu viteza lichidului v . În acest caz, timpul de parcurgere de către ultrasunete a distanței L de la sursă la un receptor fix este definit prin expresia:

$$t_1 = \frac{L}{c + v}. \quad (12-14)$$

Atunci cînd lichidul este în repaus ($v = 0$), timpul de parcurgere de către ultrasunete a aceleiași distanțe este:

$$t_2 = \frac{L}{c}. \quad (12-15)$$

Înlocuind viteza ultrasunetelor c din relația (12-15) în relația (12-14), se obține pentru viteza lichidului următoarea expresie:

$$v = \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} L. \quad (12-16)$$

Debitmetrele bazate pe utilizarea ultrasunetelor pot fi montate pe conducte din orice material, au o precizie de 2% și pot fi utilizate pentru debite de la 0 pînă la 7 000 l/oră.

Capitolul XIII

MĂSURAREA VITEZEI DE ROTAȚIE

A. GENERALITĂȚI

Un rol important în procesele de producție îl au aparatele pentru măsurarea vitezelor de rotație la motoare, agregate etc. Aparatele pentru măsurarea vitezei de rotație se numesc *tahometre* și se pot clasifica după modul de utilizare și după principiul de funcționare.

— **După modul de utilizare**, tahometrele pot fi împărțite în: *tahometre de mână* și *tahometre de banc*.

Tahometrele de mână sînt portabile și se folosesc atunci cînd este necesară cunoașterea aproximativă a vitezei de rotație. Transmiterea mișcării de rotație la tahometrele de mână se face cu ajutorul unui capăt de cuplare, care de obicei are o formă conică. Dezavantajul măsurării manuale a turației îl constituie faptul că presiunea care se exercită asupra axului de măsurat modifică turația acestuia, în special la puteri mici. Din această cauză se măsoară o turație mai mică decît cea reală.

Tahometrele de banc (stabile, fixe) au o construcție variată și se folosesc în cazul măsurării cu precizie a vitezei de rotație. Legătura între tahometrele de banc și sursa de rotație se poate realiza cu ajutorul spiralelor elastice, cablurilor flexibile și prin ambreiaje cu cauciuc. Toate aceste legături au și rolul de a amortiza șocurile și vibrațiile axului de rotație.

— **După principiul de funcționare**, tahometrele pot fi clasificate astfel: *tahometre mecanice* și *tahometre electrice*.

Tahometrele mecanice sînt în general aparate de mână, portabile, care au o rezistență mecanică mare, însă o precizie redusă.

Tahometrele electrice sînt în general stabile și au o precizie mult mai mare.

B. TAHOMETRE MECANICE

Tahometrele mecanice sînt cele mai utilizate dispozitive pentru măsurarea turației. Tahometrele mecanice pot fi alcătuite dintr-un dispozitiv centrifugal sau cronometric.

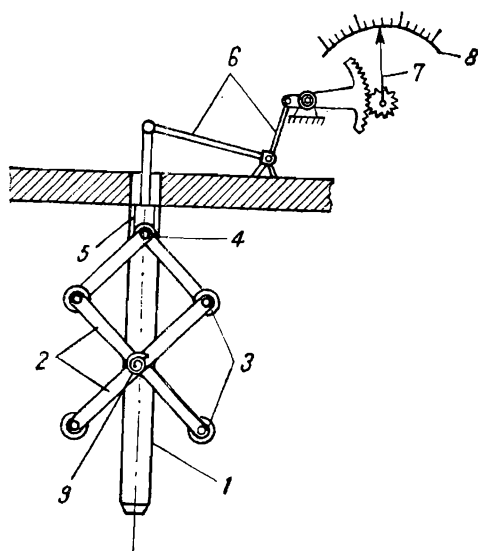


Fig. 13—1. Tahometru mecanic cu dispozitiv centrifugal.

fugal se bazează pe deplasarea unei greutate sub acțiunea forței centrifuge. Astfel, în figura 13-1, mișcarea axului a cărui turație trebuie măsurată este transmisă axului de antrenare 1, prin intermediul unor discuri cu fricțiune (neprezentate în figură). Pîrghiile 2 transmit mișcarea de rotație greutăților 3, care în timpul mișcării de rotație dau naștere unei forțe centrifuge. Se știe că forța centrifugă depinde de pătratul vitezei unghiulare ω , de masa m a greutăților și de raza r a cercului descris de greutate. Relația care definește dependența forței centrifuge F de acești parametri este:

$$F = m r \omega^2. \quad (13-1)$$

Sub acțiunea forței centrifuge, greutatea se îndepărtează de axul de rotație și cele două pîrghii articulate își vor schimba poziția reciprocă. O dată cu schimbarea poziției acestor pîrghii are loc o deplasare a piesei mobile 4 de-a lungul ghidajului. Deplasarea piesei mobile 4 determină o schimbare a poziției pîrghiilor 6, care produc o deviere a poziției acului indicator. Cuplul antagonist care ia naștere în arcul spiral 9 se opune cuplului produs de forța centrifugă F . Cînd aceste două cupluri sînt egale, pîrghiile articulate 2 se vor afla într-o poziție de echilibru. Deoarece poziția de echilibru a pîrghiilor articulate 2 determină o anumită deplasare a piesei mobile 4, rezultă că unghiul de deviație a acului indicator depinde de viteza de rotație a axului de măsurat.

Pentru ca să poată fi utilizate în mai multe domenii de măsurare, tahometrele mecanice sînt prevăzute cu o cutie de viteză. Din aceste motive,

a. **Tahometrul mecanic cu dispozitiv centrifugal** (fig. 13-1) este format dintr-un ax de antrenare 1, care transmite mișcarea de rotație unui sistem de pîrghii 2 care au la capete cîte o greutate 3. Sistemul de pîrghii 2 este legat cu o piesă mobilă 4, care culisează într-un ghidaj 5. Deplasarea piesei mobile 4 este transmisă printr-un alt sistem de pîrghii 6 la acul indicator 7, care se găsește în fața scării gradate 8. Transmiterea mișcării de rotație de la axul, a cărui turație trebuie măsurată la tahometrul mecanic, se face prin intermediul unor capete de cuplare care pot fi conice (cînd axul este scobit), sub formă de pîlnie (cînd axul este cu vîrf) și cu discuri (cînd antrenarea se face prin fricțiune). Principiul de funcționare al tahometrelor cu dispozitiv centri-

măsurarea vitezei trebuie făcută avînd în vedere raportul de turație, adică raportul între turația primită și cea indicată. De obicei, la tahometrele mecanice se pot fixa mai multe rapoarte de turație, ca, de exemplu: 1/1; 2/1; 1/2. De exemplu, atunci cînd se fixează raportul de turație 1/2, tahometrul va indica jumătate din turația măsurată, iar în cazul raportului 2/1 va indica o turație de două ori mai mare. La unele tahometre, în locul raportului de turație sînt înscrise limitele maxime ale turației pentru fiecare poziție a reductorului din cutia de viteze. Precizia tahometrelor mecanice nu depășește 2%.

b. **Tahometrul mecanic cu dispozitiv cronometric** este format dintr-un contor de rotații și un cronometru. Pentru măsurarea corectă a vitezei de rotație este necesar ca cronometrul și contorul să fie pornite și oprite simultan. Intervalul de timp pentru care contorul se cuplează la axul de rotație este de 60 s. În acest caz, viteza de rotație a axului se citește direct în rotații pe minut. Dacă cuplarea tahometrului durează mai multe minute, atunci viteza de rotație este dată de raportul dintre numărul de rotații indicat de contor și numărul de minute indicat de cronometru.

Contorul unui astfel de tahometru reprezintă un angrenaj de roți dințate, care deplasează un ac indicator. Mecanismul de orologerie este conectat la un ac indicator, care marchează timpul pentru care tahometrul a fost cuplat la axul de rotație. Pornirea tahometrului cu dispozitiv cronometric se face prin intermediul unui buton care pune în mișcare ambele mecanisme. Readucerea în zero a acelor indicatoare se face cu ajutorul unui buton separat. Precizia tahometrelor mecanice cu dispozitiv cronometric este mai mare decît a celor cu dispozitiv centrifugal, dar nu depășește 0,5%.

C. TAHOMETRE ELECTRICE

Tahometrele electrice pot fi construite pe baza mai multor principii. În prezent, cele mai utilizate tahometre electrice au la bază următoarele principii:

- *tahometrele generatoare* sînt construite pe principiul inducției electromagnetice (acestea pot fi generatoare de curent continuu sau de curent alternativ). Aceste tahometre convertesc viteza de rotație într-o tensiune, care poate fi măsurată cu un voltmetru;

- *tahometrele de inducție* prin curenți turbionari (Foucault) sînt construite tot pe principiul inducției electromagnetice, însă acestea convertesc viteza de rotație direct într-o deplasare unghiulară a unui ac indicator;

- *tahometrele cu impulsuri* convertesc viteza de rotație în frecvența unor impulsuri electrice. Cele mai des întîlnite sînt cu traductoare de contact, cu traductoare electromagnetice și cele fotoelectrice;

- *tahometrele stroboscopice* folosesc proprietatea ochiului omenesc de a reține în decurs de cîteva fracțiuni de secundă imaginea unui obiect care a dispărut din câmpul vizual.

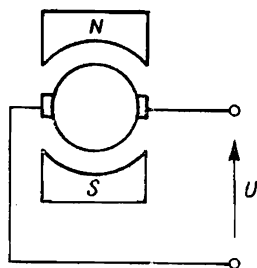


Fig. 13—2. Tahometru generator de curent continuu.

1. TAHOMETRE GENERATOARE

Tahometrele generatoare sînt construite pe principiul mașinilor electrice generatoare și dau la ieșire o tensiune electromotoare proporțională cu viteza de rotație. Se deosebesc două tipuri de tahometre generatoare: de curent continuu și de curent alternativ.

a. **Tahometrele generatoare de curent continuu** reprezintă de fapt dinamuri cu colector și cu excitație independentă dată de un magnet permanent. În figura 13-2 este reprezentat un tahometru generator de curent continuu. Tensiunea electromotoare debitată la borne este proporțională cu turația rotorului, iar constanta de proporționalitate depinde de fluxul magnetic, de excitație și de numărul de spire al înfășurării indusului. Dacă la bornele generatorului se conectează un voltmetru electromagnetic, acesta poate fi gradat direct în valori ale vitezei de rotație. Magnetul permanent utilizat pentru excitație înlătură necesitatea unei surse exterioare de energie.

Dezavantajele principale ale acestui tip de tahometru sînt următoarele: poate deranja funcționarea altor instalații electrice prin scînteile care se produc la colector, necesită o îngrijire permanentă a colectorului (deoarece murdărirea acestuia produce erori mari) și o construcție îngrijită, pentru a suporta variații mari de temperatură. Pentru ca tahometrele să încarce foarte puțin axul a cărui turație se măsoară, este necesar ca dimensiunile lor să fie mici. Din aceste motive, puterea tahometrelor este redusă, variind de la microwați pînă la zeci de wați. Tahometrele de putere mare (zeci de wați) sînt utilizate, de obicei, pentru transmiterea la distanță mare a datelor. Deoarece cu cît această distanță este mai mare, cu atît rezistența firelor de legătură este mai mare, pentru măsurarea cu precizie a turației este necesar ca tahometrul să fie de mare putere.

Principala sursă de erori la tahometrele generatoare de curent continuu este variația temperaturii mediului exterior. Astfel, la variația temperaturii poate avea loc dilatarea și variația elasticității arcului voltmetrului, variația inducției magnetice a magnetului permanent, sau variația rezistenței electrice din circuitul de măsură. La unele tahometre, pentru înlăturarea scînteilor produse la perile colectorului se conectează în paralel cu acestea un filtru RC (o rezistență conectată în serie cu un condensator).

b. **Tahometrele generatoare de curent alternativ** au de asemenea o excitație constantă, realizată cu ajutorul unui magnet permanent. În general, aceste aparate se construiesc în două variante constructive:

— prima variantă constructivă are magneți ficși, iar înfășurarea de inducție este rotativă. Tensiunea se culege cu ajutorul unor inele de contact. De obicei, acest tip de tahometre se folosesc pentru măsurarea vitezei de rotație pînă la 3000 rot/min;

— a doua variantă constructivă are magneți rotativi, iar înfășurarea de inducție este fixă și fără inele colectoare. Acest tip de tahometre se folosesc la turații peste 3 000 rot/min. Deoarece aceste tahometre au greutate și dimensiuni mici, ele au o răspîndire mare în practică. Așa cum se vede în figura 13-3, înfășurarea 1 este fixă și are capetele legate la o priză pe carcasa aparatului. Rotorul 2 este construit din bare magnetice, așezate la periferia sa.

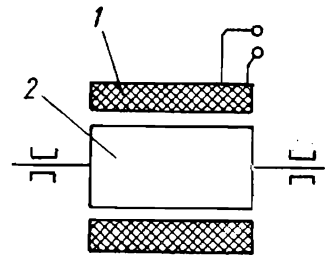


Fig. 13—3. Tahometru generator de curent alternativ.

La tahometrele generatoare de curent alternativ mărimea de ieșire în care este convertită viteza de rotație poate fi atât valoarea tensiunii alternative cît și frecvența acesteia. La tahometrele generatoare de curent alternativ este de asemenea necesară compensarea erorilor de temperatură. Deoarece transmiterea curentului la aparatul de măsurat se face de la o înfășurare fixă, nu mai intervin dezavantajele inerente în cazul tahometrelor cu generator de curent continuu.

Pentru același domeniu de utilizare, tahometrele de curent alternativ trebuie să aibă o putere mai mare, deoarece aparatele de măsurat în curent alternativ au un consum mai mare de putere decît cele magnetoelectrice și o sensibilitate mai mică. Din același motiv, precizia acestor tahometre este în general de 2%. Atunci cînd pentru măsurarea tensiunii rezultate se recurge tot la utilizarea voltmetrelor magnetoelectrice, este necesară folosirea unui redresor.

2. TAHOMETRE DE INDUCȚIE PRIN CURENȚI TURBIONARI

Tahometrele de inducție prin curenți turbionari (fig. 13-4) sînt alcătuite dintr-un ax de cuplare, care antrenează un magnet permanent 1, un disc circular din aluminiu 2, un resort spiral 3 și un ac indicator 4. Magnetul permanent se rotește cu o viteză de rotație egală cu cea care trebuie măsurată.

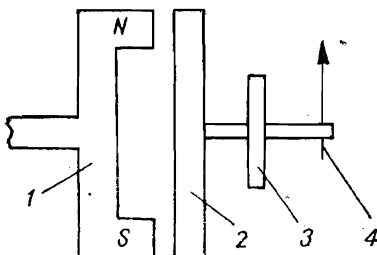


Fig. 13—4. Tahometru de inducție prin curenți turbionari.

O dată cu rotirea magnetului permanent, în discul circular plasat în fața acestuia se induc curenți turbionari (Foucault). Datorită interacțiunii dintre curenții induși în disc și cîmpul magnetic apare un cuplu motor proporțional cu viteza de rotație. Acest cuplu motor, care este echilibrat de cuplul rezistent al resortului spiral, rotește discul cu un unghi α . Deoarece cuplul C_1 creat de curenții turbionari este proporțional cu turația n :

$$C_1 = K_1 n, \quad (13-2)$$

iar cuplul rezistent C_2 al resortului spiral este proporțional cu unghiul de rotație al discului:

$$C_2 = K_2 \alpha, \quad (13-3)$$

din egalitatea acestor relații rezultă că unghiul de rotație poate fi gradat direct în unități de măsură a vitezei de rotație. Pentru citirea rotației, o dată cu discul din aluminiu se mișcă și acul indicator, al cărui cadran este fix.

Tahometrul de inducție prin curenți turbionari are erori de măsură, datorită variației temperaturii mediului exterior. Astfel, la variația temperaturii, se schimbă fluxul magnetului permanent, rezistența electrică a discului din aluminiu și elasticitatea arcului spiral. Pentru micșorarea erorii de temperatură se folosesc șunturi electromagnetice și se utilizează materiale speciale pentru magnetul permanent. La unele tahometre cu curenți turbionari de construcție recentă, în loc de disc se folosește un pahar din aluminiu, în interiorul căruia se rotește magnetul permanent sub forma unui rotor.

3. TAHOMETRE CU IMPULSURI

a. **Tahometrele cu impulsuri cu traductor de contact** (fig. 13-5) sînt formate dintr-un condensator C , care prin intermediul comutatorului 1 formează un circuit de încărcare, cu sursa de tensiune constantă E , sau un circuit de descărcare, cu instrumentul de măsurat G . Comutatorul 1 reprezintă un tambur format din doi cilindri metalici, izolați între ei după o linie în zigzag. La rotirea tamburului, pe care se găsesc trei perii, circuitul electric al condensatorului se va închide, în mod succesiv, prin cilindru din stînga și prin cel din dreapta. Cînd condensatorul este conectat la baterie, el se va încărca pînă la o tensiune aproximativ egală cu E , ceea ce se realizează prin alegerea corespunzătoare a valorii condensatorului și a rezistențelor electrice din circuit (nereprezentate în figură). Cînd condensatorul este conectat la instrumentul de măsurat, are loc o descărcare a energiei acumulate și prin circuit va trece un curent. Procesul de încărcare-descărcare al condensatorului se repetă cu o frecvență care depinde de numărul de contacte (constant pentru construcția adoptată) și de viteza de rotație a tamburului. Prin urmare, deviația acului indicator, care este proporțională cu valoarea medie a curentului, depinde de turația măsurată, iar scara poate fi gradată direct în rotații/min.

În afară de erorile datorită variației temperaturii mediului exterior, acest tip de tahometre are erori de măsură și datorită variației tensiunii de alimentare E .

b. **Tahometrele cu impulsuri cu traductoare electromagnetice** au același principiu de funcționare ca tahometrele generatoare, cu deosebirea că la acestea există la ieșire o frecvență de impulsuri aproximativ dreptunghiulare. În figura 13-6 este reprezentat un tahometru cu impulsuri, la care indusul este fix și deci are o înfășurare de asemenea fixă. Inductorul este de asemenea fix și este format dintr-un magnet permanent. În spațiul dintre inductor și

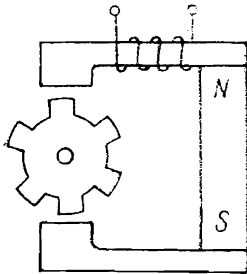


Fig. 13—5. Tahometru cu impulsuri cu traductor de contact.

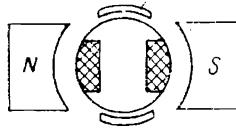


Fig. 13—6. Tahometru cu impulsuri cu traductoare electromagnetice.

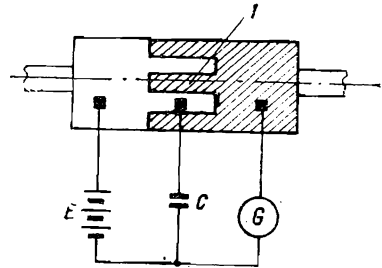


Fig. 13—7. Tahometru cu impulsuri cu traductoare electromagnetice (variantă constructivă).

indus se rotește o piesă 1 din material magnetic, de forma unui cilindru tăiat. O dată cu rotirea acestei piese, câmpul magnetic se modifică periodic și în înfășurare apare o succesiune de impulsuri.

Tahometrele cu impulsuri cu traductoare electromagnetice se construiesc în mai multe variante constructive, care diferă prin metodele de modificare a câmpului magnetic. Astfel, la unele tahometre, ca, de exemplu, cel prezentat în figura 13-7, în câmpul magnetic dintre două armături se găsește o roată dințată, fixată solidar cu axul de antrenare. La mișcarea roții dințate, într-o înfășurare fixată pe una dintre armături se induc impulsuri electrice. În momentul când între cele două armături se află dinții, liniile de forță trec de la polul nord la polul sud prin roata dințată și, în acest caz, fluxul magnetic va fi maxim. Când între cele două armături se află porțiunile dintre dinți, fluxul magnetic va fi minim. Prin urmare, o dată cu mișcarea roții dințate are loc o variație a fluxului magnetic din circuitul magnetic, format de roată, armături și magnetul permanent. Datorită variației fluxului magnetic, în înfășurarea de pe armătură se induc impulsuri electrice. Deoarece numărul de dinți al roții dințate este constant, frecvența impulsurilor induse este direct proporțională cu viteza de rotație a axului de măsurat. Astfel, dacă roata dințată are m dinți, iar turația este egală cu n rotații pe minut, atunci frecvența impulsurilor f (adică numărul de impulsuri pe secundă) va fi:

$$f = \frac{nm}{60} \cdot \quad (13-4)$$

Dacă se alege o roată dințată cu $m = 60$ dinți, atunci frecvența este egală cu turația. În acest caz, un frecvențmetru cuplat la ieșirea traductorului va indica direct viteza de rotație.

c. **Tahometre fotoelectrice.** Spre deosebire de tahometrele cu impulsuri cu traductor de contact, la tahometrele cu traductoare fotoelectrice încărcarea și descărcarea unui condensator se comandă prin intermediul unei celule fotoelectrice. În figura 13-8 este prezentată schema simplificată a unui tahometru fotoelectric. Celula fotoelectrică este iluminată de fasci-

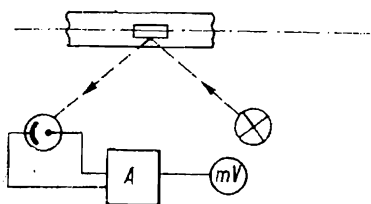


Fig. 13—8. Tahometru fotoelectric.

culul de raze reflectat de o oglindă, fixată pe fața laterală a axului de măsurat. Variația iluminării celei fotoelectrice determină apariția unui semnal electric, care este amplificat și transmis la instrumentul de măsurat. Ca și în cazul tahometrelor cu impulsuri analizate mai înainte, aparatul de măsurat este un frecvențmetru.

4. TAHOMETRE STROBOSCOPICE

Tahometrele stroboscopice se bazează pe efectul stroboscopic. Se deosebesc *stroboscoape cu obturare mecanică* și *stroboscoape cu impulsuri luminoase*.

a. **Tahometrul stroboscopic cu obturare mecanică** este compus dintr-un tahometru electric sau mecanic și un dispozitiv stroboscopic. Așa cum se vede din figura 13-9, tahometrul stroboscopic cu obturare mecanică este alcătuit dintr-un mic motor electric 1, alimentat de la o baterie de acumulatori prin intermediul unui reostat, dintr-un disc de aluminiu 2, prevăzut cu un număr de orificii și dintr-un tahometru 3, pentru citirea vitezei de rotație a discului. Viteza de rotație a discului se reglează cu ajutorul reostatului din circuitul de alimentare al motorului electric.

Pentru a măsura turația unui ax, acesta se prevede cu un reper. Turația discului se reglează pînă cînd reperul este văzut imobil de către observator. În acest caz, viteza axului și cea a discului sînt egale sau diferă printr-un multiplu întreg. Dacă această condiție nu este îndeplinită, atunci imaginea reperului se rotește. Pentru a măsura cu precizie o turație utilizînd obturarea mecanică, este necesar ca orificiile să fie cît mai mici. Aceasta însă este în contradicție cu condiția ca lumina de la reper să fie suficientă, pentru a putea fi observat. Din descrierea principiului de funcționare reiese că tahometrele stroboscopice cu obturare mecanică nu necesită o cuplare prin frecare cu axul de măsurat.

b. **Tahometrul stroboscopic cu impulsuri luminoase.** Deoarece stroboscoapele cu obturare mecanică au o construcție complicată, în industrie se folosesc stroboscoapele cu impulsuri luminoase. O sursă de impulsuri luminoase, cu perioada de repetiție variabilă, luminează axul a cărui viteză de rotație trebuie măsurată. Impulsurile de lumină trebuie să aibă o durată foarte scurtă

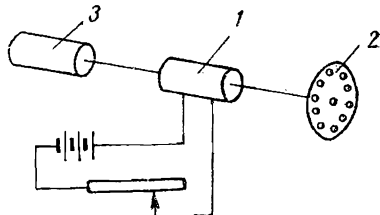


Fig. 13—9. Tahometru stroboscopic cu obturare mecanică.

în raport cu perioada de rotație a axului. Pe axul a cărei turație se măsoară, se trasează un reper. Frecvența de repetiție a impulsurilor se reglează pînă cînd imaginea reperului apare staționară. Pe ax poate apărea un număr finit de imagini ale reperului. Dacă frecvența impulsurilor este astfel reglată încît să existe o singură imagine staționară a reperului, atunci $f = n$. Dacă frecvența impulsurilor este un multiplu al turației, atunci imaginea reperului apare de mai multe ori. Pentru a măsura exact turația, se pornește de la valori mici ale frecvenței și se mărește frecvența pînă cînd există o singură imagine a reperului.

În aparatele moderne, ca surse pentru impulsuri luminoase se folosesc tuburi cu neon și tiratroane. Precizia tahometrelor stroboscopice cu impulsuri luminoase depinde de precizia oscilatorului care produce frecvența variabilă. Avantajul acestui tahometru stroboscopic este domeniul larg de măsurare a vitezei de rotație, datorită absenței cuplajului prin frecare.

Capitolul XIV

MĂSURAREA UMIDITĂȚII, VISCOZITĂȚII ȘI ANALIZA GAZELOR

A. MĂSURAREA UMIDITĂȚII

Apa are un rol important în desfășurarea multor procese industriale sau de laborator. Astfel, este cunoscut că în prezența apei multe materiale își schimbă proprietățile fizice și chimice. De exemplu, substanțele higroscopice absorb apa, putând avea loc schimbări de volum sau de structură. Există și substanțe foarte sensibile la uscăciune (de exemplu unele cristale). Deci, în foarte multe cazuri, umiditatea este un parametru de care trebuie să se țină seama în operațiile de manipulare, ambalare, depozitare și fabricare.

Măsurarea umidității, adică a conținutului de apă dintr-un material, are ca scop cunoașterea exactă a conținutului de material. De exemplu, cunoașterea conținutului de apă în materia primă permite determinarea cantității altor componenți, astfel încât procesul tehnologic să se desfășoare în limitele stabilite.

1. MĂSURAREA UMIDITĂȚII MATERIALELOR

a. **Metoda clasică.** Pentru determinarea conținutului de umiditate a unui produs se poate utiliza metoda clasică. Pentru aceasta se ia o probă din produsul analizat și se determină cu ajutorul unui cântar analitic masa în stare umedă. După ce proba se usucă într-un cuptor cu temperatură constantă, se determină masa probei în stare uscată. Notînd cu m_i masa în stare umedă (inițială) și cu m masa în stare uscată, atunci conținutul de umiditate al produsului (exprimat în procente) este $\frac{m_i - m}{m_i} 100$.

Măsurarea umidității prin metoda clasică este o operație complicată și necesită un timp mare din cauza uscării, care poate dura la unele produse câteva ore. În afară de aceasta, în timpul uscării la o temperatură constantă, pe lângă apă mai pot dispărea și alte substanțe, ceea ce face ca rezultatul expe-

rienței să nu fie exact. În condițiile automatizării proceselor de producție este necesară măsurarea în mod continuu a umidității.

b. Metodele electrice pentru determinarea umidității diferitelor produse se bazează pe măsurarea rezistenței chimice sau a constantei dielectrice a unei probe din produsul analizat. Aceste metode pot fi aplicate și pentru măsurarea continuă a umidității în condiții industriale.

Determinarea umidității unui material prin măsurarea rezistenței electrice se bazează pe faptul că umiditatea influențează valoarea rezistivității. Deoarece rezistența electrică depinde și de lungimea și secțiunea probei utilizate, se măsoară de obicei umiditatea unei probe cu dimensiuni cunoscute. Un aparat pentru determinarea umidității prin măsurarea rezistenței electrice a unei probe reprezintă de fapt un ohmmetru. În unele aparate de acest tip, pentru mărirea sensibilității se folosesc amplificatoare electronice.

În figura 14-1 este prezentat schematic un aparat de măsurat umiditatea, bazat pe măsurarea rezistenței electrice cu ajutorul logometrului. Aparatul este format din doi electrozi, între care se găsește proba, o baterie de alimentare și o rezistență electrică constantă. Deci, în circuitul unei înfășurări a logometrului se găsește rezistența electrică variabilă a probei analizate. În funcție de umiditatea probei se schimbă rezistența sa electrică și acul indicator va devia cu un unghi ce poate fi gradat în procente de umiditate. Aparatele de măsurat umiditatea, bazate pe acest principiu, au dezavantajul că indicațiile depind de starea probei, adică de porozitate, de conținutul de impurități etc.

Determinarea umidității unui material prin măsurarea constantei dielectrice se bazează pe variația capacității unui condensator, în funcție de umiditatea dielectricului. Constanta dielectrică ϵ a celor mai multe materiale este cuprinsă între 2 și 10, iar a apei este egală cu 81. Constanta dielectrică a unui material umed crește foarte repede cu conținutul de apă. Deci, măsurând capacitatea unui condensator de dimensiuni cunoscute, în care se folosește ca dielectric materialul cercetat, se poate determina umiditatea acestuia. Condensatorul reprezintă de obicei o celulă în care este introdus materialul analizat. Pentru măsurarea variației constantei dielectrice a condensatorului se folosesc circuite de rezonanță.

În figura 14-2 este prezentat schematic un astfel de circuit utilizat

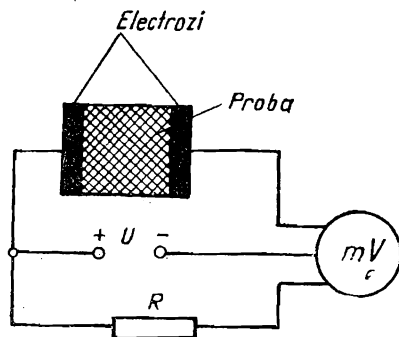


Fig. 14—1. Măsurarea umidității cu ajutorul logometrului.

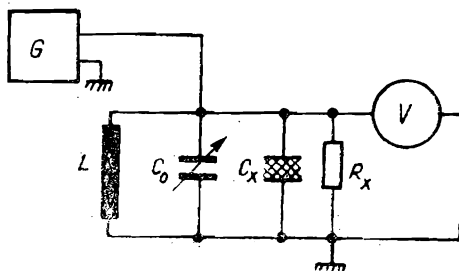


Fig. 14—2. Măsurarea umidității folosind circuite de rezonanță.

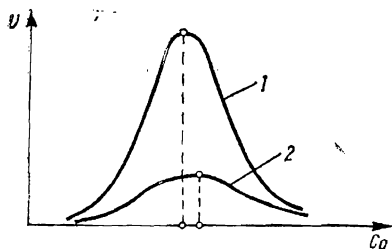


Fig. 14-3. Variația tensiunii de rezonanță în cazul a două probe cu umiditate și rezistență electrică diferite: 1 — probă cu rezistență electrică mare; 2 — probă cu rezistență electrică mică.

care are loc rezonanța se determină prin varierea capacității C_0 , pînă cînd voltmetrul electronic va indica o tensiune maximă. Variația tensiunii indicate de aparatul de măsurat are aspectul prezentat în figura 14-3. Cînd se schimbă umiditatea dielectricului, rezonanța va avea loc pentru o altă valoare a capacității C_0 . Prin urmare, variind capacitatea C_0 pînă cînd aparatul de măsurat indică maximum, poziția butonului de variere a capacității C_0 poate fi gradată în procente de umiditate. La variația umidității dielectricului se schimbă și valoarea maximă a tensiunii de rezonanță, obținîndu-se curbe ca în figura 14-3. Se poate demonstra că valoarea capacității C_0 pentru care are loc rezonanța depinde numai de valoarea constantei dielectrice a condensatorului C_x , iar valoarea tensiunii la rezonanță depinde și de rezistența electrică R_x a dielectricului analizat. Astfel, cînd rezistența electrică R_x scade, capacitatea este parțial șuntată și tensiunea maximă scade.

În unele aparate de măsurare a umidității se folosesc tot circuite de rezonanță (fig. 14-2), însă ca aparate indicatoare se folosesc frecvențmetre. Într-o serie de aparate indicatoare de construcție recentă se utilizează afișarea numerică a rezultatelor.

Cele mai perfecționate aparate electrice de măsurare a umidității au o precizie ce variază în limitele 0,25—0,5%, iar aparatele mai simple au o precizie ce variază în limitele 1—3%. Etalonarea aparatelor pentru măsurarea umidității se face de obicei prin comparare cu metoda clasică și deci include toate erorile care pot apărea în cazul acesteia.

c. **Metodele tensometrice și fotoelectrice.** În afară de metodele electrice pentru măsurarea umidității unui material se mai utilizează și metodele tensometrice și fotoelectrice.

Metodele tensometrice corelează umiditatea cu tensiunea de absorbție a apei din mediul de măsurat; cele fotoelectrice corelează umiditatea cu gradul de reflecție al luminii incidente. Fiecare din aceste metode se folosește într-un domeniu relativ restrîns de variație a umidității.

d. **Metoda blocurilor poroase.** Pentru a acoperi întreg domeniul posibil de variație a umidității este necesară folosirea simultană a mai multor metode. Deoarece acest caz se întîlnește relativ rar, în practică o singură metodă aleasă judicios este suficientă. Totuși, există metode pentru măsurarea umidității, care reprezintă o sinteză a două dintre metodele enumerate mai sus.

pentru măsurarea umidității. Un generator de semnale de înaltă frecvență G alimentează circuitul de rezonanță, format din inductivitatea L și din două condensatoare conectate în paralel. Condensatorul C_x are capacitatea dependentă de umiditatea dielectricului, iar condensatorul C_0 are o capacitate variabilă pentru acordarea circuitului de rezonanță. Aparatul indicator este un voltmetru electronic. Cînd dielectricul este uscat sau umed, rezonanța are loc pentru valori diferite ale capacității C_0 . Valoarea pentru

De exemplu, metoda blocurilor poroase folosește metoda tensometrică și metoda electrică (rezistivă). Conform acestei metode, un bloc de material poros introdus în mediul unde se măsoară umiditatea va fi permanent în echilibru de umiditate cu mediul. Folosind doi electrozi metalici, se măsoară rezistența electrică a blocului poros, care variază o dată cu umiditatea. Dimensiunile și materialul blocului poros se aleg astfel, ca timpul de stabilire a echilibrului de umiditate să fie mic. Această metodă are dezavantajul că prezintă dificultăți de confecționare a blocurilor, pentru obținerea unei reproductibilități înalte, însă are avantajul că înlătură unele erori datorită variației rezistenței electrice a materialului analizat.

2. MĂSURAREA UMIDITĂȚII GAZELOR

Metodele cele mai utilizate pentru măsurarea umidității gazelor sînt: metodele higroscopice, psihrometrice și electrice.

a. **Metodele de măsurare higroscopice** se bazează pe proprietatea unor substanțe de a-și schimba proprietățile fizico-chimice, în funcție de umiditatea aerului înconjurător (de exemplu, poate avea loc o schimbare a masei, a lungimii, a volumului acestor substanțe etc.).

Unul dintre cele mai răspîndite aparate pentru măsurarea umidității aerului este *higrometrul cu fir de păr*, prezentat în figura 14-4. Un fir de păr omenesc degresat și preparat în mod special se alungește în funcție de conținutul lui de apă. În figura 14-5 este reprezentată curba de alungire a firului de păr, în funcție de umiditatea relativă. Se observă că alungirea firului de păr depinde neliniar de umiditatea relativă. La umidități mari, unde ar fi de așteptat o absorbție mare de apă, alungirea firului de păr este mai mică. La umidități mici, higrometrul cu fir de păr nu poate fi utilizat pentru mă-

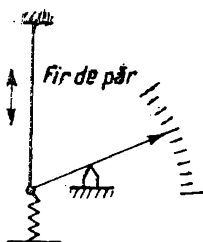


Fig. 14—4. Higrometru cu fir de păr.

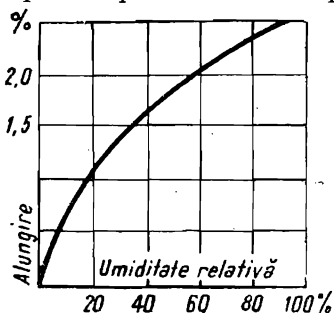


Fig. 14—5. Alungirea firului de păr în funcție de umiditatea relativă.

surări de lungă durată, deoarece are loc o schimbare continuă a lungimii firului de păr. Pentru înlăturarea acestei erori, higrometrele care funcționează la umidități reduse trebuie regenerate. În acest scop, la intervale de

3—7 zile higrometrul cu fir de păr se introduce într-o atmosferă cu o umiditate relativă mare, sau se învelește cu o țesătură umedă. Higrometrele cu fir de păr au avantajul că indicațiile lor nu depind de viteza aerului înconjurător, iar variația temperaturii are o influență redusă, deoarece firul de păr are un coeficient termic de dilatare mic. În cazul unei întrețineri atente, precizia de măsurare este de 3%. Avantajul principal al higrometrelor cu fir de păr îl constituie construcția simplă și prin urmare prețul de cost redus.

b. **Metodele de măsurare psihrometrice** se bazează pe efectul psihrometric și sînt foarte precise. Avantajul principal al acestor metode îl constituie simplitatea aparaturii de măsurat. De asemenea, măsurările de temperatură la care se rezumă metodele psihrometrice pot fi automatizate, ceea ce permite să se înregistreze sau să se transmită la distanță rezultatele obținute.

Psihrometrele folosesc în cazul cel mai simplu două termometre (fig. 14-6); un termometru (1) măsoară temperatura gazului a cărui umiditate se măsoară, iar celălalt termometru (2) are rezervorul cu mercur în permanență umed, ceea ce se realizează cu ajutorul unei țesături higroscopice ce absoarbe apa dintr-un vas. Acest termometru va indica totdeauna o temperatură mai mică decît primul, deoarece apa se evaporă și temperatura termometrului scade. Aceasta se explică prin faptul că pe suprafața termometrului se consumă o cantitate determinată de căldură pentru evaporarea apei. Cu cît gazul a cărui umiditate se măsoară conține mai puțini vapori de apă, cu atît evaporarea apei de pe suprafața termometrului umed va fi mai intensă. Cu cît evaporarea este mai intensă, cu atît mai mare va fi diferența de temperatură dintre termometrul uscat și termometrul umed. Pentru determinarea corectă a umidității, în afară de diferența de temperatură, mai este necesar să se cunoască viteza de mișcare a gazului. Din aceste motive, majoritatea psihrometrelor sînt prevăzute cu ventilație artificială, care asigură o anumită viteză de mișcare a gazului analizat.

Deoarece determinarea umidității prin metoda psihrometrică, folosind relații analitice, este anevoioasă și incomodă, în practică se recurge la tabele sau la diagrame speciale.

c. **Metodele de măsurare electrice.** Pentru măsurarea umidității aerului pot fi utilizate și metode electrice.

De exemplu, *higrometrul cu rezistență electrică* se bazează pe proprietatea unor substanțe chimice de a-și schimba conductivitatea electrică, în funcție de umiditatea aerului înconjurător. Ca substanțe higroscopice se folosesc clorura de litiu sau acidul sulfuric. În acest scop se realizează un montaj în punte (fig. 14-7), unde într-un braț se găsește rezistența variabilă formată de substanța higroscopică dintre cei doi electrozi. Dezechilibrul punții depinde de umiditatea aerului și se măsoară cu un aparat indicator.

O altă metodă de măsurare constă în utilizarea a două termorezistențe în locul termometrelor 1 și 2, utilizate în cazul psihrometrului prezenta în figura 14-6. O punte electrică avînd în două brațe cele două termorezistențe

va avea o tensiune de dezechilibru proporțională cu umiditatea. Această tensiune poate fi transmisă la un aparat indicator sau la un adaptor utilizat într-un sistem automat.

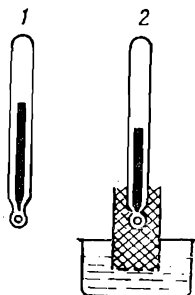


Fig. 14—6. Psihrometru.

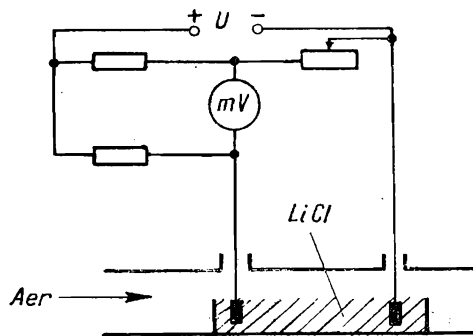


Fig. 14—7. Higrometru cu rezistență electrică.

B. MĂSURAREA VISCOZITĂȚII

Viscozitatea este un parametru care caracterizează distanța, atracția între moleculele unui fluid, precum și dimensiunile acestora. Pentru determinarea viscozității se folosesc trei metode principale:

- măsurarea vitezei de curgere a fluidului printr-un tub capilar de dimensiuni cunoscute;
- măsurarea vitezei de cădere a unei bile printr-un tub, umplut cu fluidul cercetat;
- măsurarea efectului de antrenare a fluidului în mișcare de rotație asupra unui cilindru suspendat.

Prin urmare, toate metodele se bazează pe acțiunea reciprocă dintre fluidul cercetat și un corp străin (pereții tubului capilar, bila, cilindrul).

a. Determinarea viscozității prin metoda măsurării vitezei de curgere a fluidului printr-un tub capilar de dimensiuni cunoscute. În acest caz se măsoară timpul în care sub acțiunea unei forțe externe, o cantitate determinată de lichid trece printr-un tub capilar de dimensiuni cunoscute. Astfel, viscozitatea se definește cu ajutorul formulei lui Poiseuille (fără a ține seama de viteza fluidului la ieșire din tubul capilar):

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \nu l} \quad (14-1)$$

unde:

- r este raza tubului capilar;
- ν — cantitatea de lichid scurs prin tubul capilar;
- l — timpul de curgere a fluidului.

- l — lungimea tubului capilar;
 p — presiunea de curgere a fluidului.

Din practica măsurărilor reiese că pentru determinarea cu precizie a viscozității (folosind relația 14-1) este necesar ca lungimea tubului capilar și timpul de curgere să fie cât mai mari, iar tubul capilar să aibă un diametru cât mai uniform realizat. Prin urmare, determinarea precisă a viscozității impune condiții extrem de exigente.

De exemplu, în cazul viscozimetruului bazat pe măsurarea vitezei de curgere, se pune problema, practic irealizabilă, de a construi tuburi capilare de cel puțin 400 mm lungime, cu un diametru perfect uniform.

Din această cauză se recurge la măsurarea relativă a viscozității, folosind substanțe cu o viscozitate cunoscută. În acest scop, cu ajutorul acestor substanțe se efectuează operația de gradare a aparatului. Ca substanțe etalon cu viscozitate cunoscută se folosesc substanțe care își păstrează în timp proprietățile (de exemplu, apa și uleiurile minerale; apa se folosește mai rar ca substanță etalon, deoarece are o viscozitate redusă).

b. Determinarea viscozității prin metoda măsurării vitezei de cădere a unei bile printr-un tub umplut cu fluidul cercetat. Metodele radioactive pentru măsurarea viscozității se bazează pe determinarea vitezei de cădere a unei bile într-un recipient cu fluidul analizat. Din legea lui Stokes reiese că viscozitatea η se poate determina cu ajutorul relației:

$$\eta = \frac{2}{9} g \frac{\rho_s - \rho}{\nu} r^2 A B, \quad (14-2)$$

unde:

- V este viteza de cădere a bilei;
 r — raza bilei;
 ρ și ρ_s — densitatea fluidului, respectiv a sferei;
 A și B — factori de corecție.

Măsurarea viscozității pe baza determinării vitezei de cădere a unei bile se face în două variante principale.

— În prima variantă, viscozimetruul radioactiv utilizează o bilă care include o sursă radioactivă de cobalt (Co^{60}). Pentru măsurarea vitezei de cădere se determină timpul de trecere a bilei pe lângă două repere, în care sînt plasate două contoare pentru detectarea radiațiilor. Așa cum reiese din figura 14-8, viscozimetruul cu bilă radioactivă este format dintr-un ecran cu plumb 1, unde sînt montate contoarele Geiger 2 și un bloc electronic 3. Acesta conține un cronometru electric, care este declanșat de impulsul sosit de la contorul de sus și este oprit la sosirea impulsului de la contorul de jos. Timpul scurs între cele două impulsuri, determinat cu ajutorul cronometruului electric, este tocmai timpul în care bila radioactivă 4 parcurge distanța între cele două fante (deci se poate determina viteza de cădere a bilei). Această metodă de măsurare a viscozității necesită alegerea unor condiții de geometrie optimă în vederea micșorării erorilor. Astfel, deoarece impulsurile de la contoare trebuie să fie de scurtă durată, este necesară o adîncime optimă a fantei.

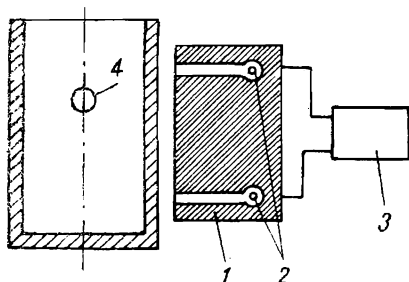


Fig. 14-8. Determinarea viscozității pe baza măsurării vitezei de cădere a unei bile radioactive printr-un recipient umplut cu fluidul cercetat.

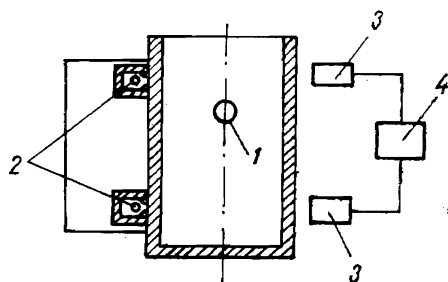


Fig. 14-9. Determinarea viscozității pe baza măsurării vitezei de cădere a unei bile inactice printr-un recipient umplut cu fluidul cercetat.

— A doua variantă de măsurare a viscozității este prezentată în figura 14-9 și prevede utilizarea unei bile inactice 7 și a două surse radioactive 2 introduse într-un bloc de plumb cu două fante. În fața fiecărei fante (de partea cealaltă a vasului) se găsește câte un contor 3. Când bila trece prin fața sursei radioactive se micșorează intensitatea radiației ce ajunge la contor, deoarece bila absoarbe radiații. Prin urmare se obțin două semnale care marchează trecerea bilei prin fața contorului respectiv. Aparatul mai conține un bloc electronic 4, cu același rol ca cel din figura 14-8. Această metodă are avantajul că nu necesită manipularea unei bile radioactive. Bila trebuie să fie confecționată dintr-un material cu densitate foarte mare, pentru a mări puterea de absorbție a radiațiilor.

Ambele variante constructive au dezavantajul că determinarea viscozității pe baza relației 14-2 necesită o geometrie extrem de pretentioasă și instalații electronice complexe. Din aceste motive, metodele radioactive pentru măsurarea viscozității au o utilizare limitată, fiind folosite în laboratoare cu aparatură modernă, iar pentru gradare se folosesc tot substanțe etalon cu o viscozitate cunoscută.

c. **Determinarea viscozității prin metoda măsurării efectului de antrenare a fluidului în mișcare de rotație asupra unui cilindru suspendat.** În industrie, pentru măsurarea viscozității se folosesc pe scară largă viscozimetre rotative, compuse dintr-un recipient cilindric în care se introduce substanța de măsurat. În figura 14-10 este reprezentat un viscozimetru rotativ, unde în interiorul recipientului cilindric 1 se montează concentric un cilindru de măsură 2. Recipientul 1 se rotește cu o viteză constantă de către un motor sincron M prin intermediul reductorului R . În funcție de fluiditatea substanței, a cărei viscozitate se măsoară, cilindrul interior va fi antrenat într-o

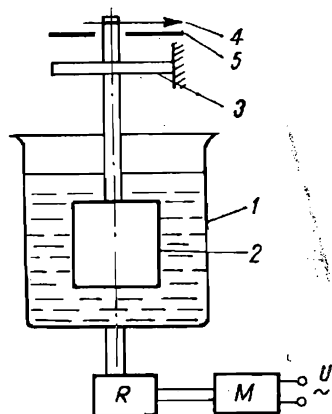


Fig. 14-10. Viskoizmetru rotativ.

mișcare de rotație. Astfel, cuplul de rotație aplicat cilindrului interior va fi cu atât mai mare, cu cât viscozitatea substanței analizate este mai mare. La substanțe cu viscozitate mică, adică cu fluiditate mare, cuplul de rotație aplicat cilindrului interior este mic. Pentru a măsura cuplul de rotație se folosește un resort spiral antagonist 3. Prin urmare, la echilibrul dintre momentul antagonist al resortului și cuplul aplicat cilindrului interior, poziția acului indicator 4 de pe scara 5 va depinde de viscozitatea substanței analizate. În acest caz, unghiul de rotire al cilindrului este proporțional cu cuplul aplicat acestuia și poate fi gradat în unitățile respective.

Ca și în cazul celorlalte tipuri de viscozimetre, etalonarea acestui aparat se face cu substanțe etalon de viscozitate cunoscută, deoarece relațiile de calcul sînt aproximative.

d. **Sonde magnetostrictive.** Pe lângă metodele clasice expuse mai sus, în prezent se folosesc și alte metode de măsurare a viscozității. De exemplu, recent s-au construit sonde magnetostrictive pentru măsurarea viscozității.

Astfel, o lamă de oțel magnetostrictiv este pusă în stare de vibrație cu ajutorul unei bobine, care o înconjură pe jumătate din lungimea ei. Viscozitatea se măsoară prin determinarea puterii necesare pentru menținerea unei amplitudini constante a oscilațiilor lamei magnetostrictive. Cu cât viscozitatea este mai mare, cu atât este necesară o putere mai mare pentru întreținerea oscilațiilor lamei la o valoare constantă. Ca și în cazul celorlalte metode, etalonarea se face tot cu substanțe de viscozitate cunoscută.

C. ANALIZA GAZELOR

1. GENERALITĂȚI

În tehnica modernă, analiza compoziției gazelor reprezintă o problemă deosebit de importantă. Cunoașterea compoziției gazelor care intră sau care rezultă dintr-un proces tehnologic constituie condiția de bază pentru automatizarea instalației respective.

De exemplu, dezvoltarea instalațiilor termoeenergetice (cuptoare industriale, furnale etc.) impune ridicarea randamentului arderii și reducerea prețului de cost al proceselor de ardere. O ardere necorespunzătoare este neeconomică și poate avea influență nefavorabilă și asupra calității produselor. Arderea este o reacție exotermică, în care carbonul, hidrogenul și sulful se combină cu oxigenul din aer, dînd ca produse finale, în cazul arderii complete bioxid de carbon (CO_2), vaporii de apă (H_2O), bioxid de sulf (SO_2), oxigen (O_2) și azot (N_2). În cazul arderii incomplete mai apar oxidul de carbon (CO), hidrogenul (H_2) și hidrocarburi superioare (C_nH_m). Pentru a asigura o ardere completă este necesară o anumită cantitate minimă de aer, care se calculează în funcție de compoziția combustibilului. În realitate, cantitatea de aer obținută din punct de vedere teoretic nu este suficientă pentru o ardere

completă, deoarece nu se poate asigura un contact perfect între aer și combustibil (rezultă că nu tot oxigenul ia parte la procesul de ardere). De aceea, pentru o ardere completă este necesar să se introducă o cantitate mai mare de aer, adică să se asigure un exces de aer. Dacă excesul de aer este mic, o parte din combustibil rămâne neutilizat și produsele de ardere vor conține CO și H_2 . Dacă excesul de aer este prea mare, au loc pierderi de căldură datorită încălzirii unor cantități de aer ce se evacuează în atmosferă. Pentru a controla procesul de ardere este suficient să se măsoare conținutul de CO_2 și O_2 în gazele de ardere.

În general, o analiză de gaze constă în determinarea concentrației fiecărui component. În acest scop se alege o însușire specifică a componentului care urmează a fi măsurat și prin aceasta se separă de ceilalți componenți. Proprietățile alese pot fi chimice sau fizice. Proprietățile chimice ale componentelor constau, de obicei, în absorbția diferită a componentelor în diverși reactivi chimici. Componentul de analizat este exprimat după absorbția chimică prin diferența de volum care apare. Proprietățile fizice ale componentelor, ca, de exemplu, efectul magnetic, conductivitatea termică etc., stau la baza construcției analizoarelor de gaze automate.

Analizoarele manuale se bazează în general pe proprietățile chimice ale componentelor și se întrebuițează pentru controlul periodic al calității produselor sau pentru verificarea preciziei analizoarelor automate, care sînt conectate în mod continuu pentru controlul produselor.

Analizoarele automate bazate pe proprietățile chimice ale componentelor au un mod de lucru discontinuu (adică dau rezultatele măsurării la anumite intervale de timp), iar cele bazate pe proprietăți fizice au un mod de lucru continuu. Din această cauză, ca traductoare în sistemele automate se utilizează în general analizoarele bazate pe proprietățile fizice ale componentelor

2. ANALIZOARE DE GAZE

Pentru analiza gazelor o largă răspîndire au căpătat metodele electrice, magnetice și termice. În ultimul timp au început să fie folosite și metodele fizicii atomice: spectroscopia de masă și iradierea radioactivă.

a. **Metoda electrică de analiză a gazelor** se bazează pe măsurarea rezistenței electrice, a conductivității electrice sau a constantei dielectrice a diferitelor componente.

b. **Metoda magnetică de analiză a gazelor** are o utilizare mai largă în industrie. Determinarea compoziției unui amestec de gaze prin metoda magnetică se bazează pe proprietatea de magnetizare a componentelor gazului. Prin aceasta se înțelege proprietatea unor substanțe de a crea un câmp magnetic suplimentar, cînd sînt supuse unui câmp magnetic de excitație. Pentru aceste substanțe, care se numesc paramagnetice, este caracteristic faptul că proprietățile lor depind de temperatură. Astfel, odată cu creșterea temperaturii proprietățile lor magnetice scad.

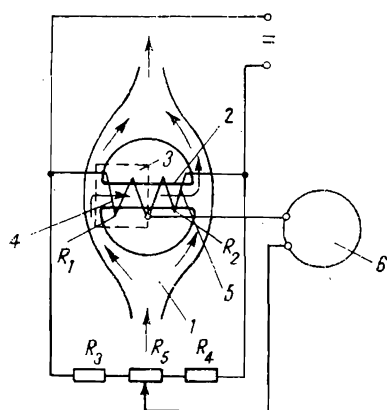


Fig. 14—11. Analizor magnetic de gaze.

În practică, metoda magnetică se folosește exclusiv la analiza conținutului de oxigen într-un amestec de gaze. Principiul de funcționare al aparatelor pentru determinarea compoziției de oxigen se bazează pe proprietatea paramagnetică a oxigenului și pe variația acestei proprietăți cu temperatura.

Din punct de vedere constructiv, aparatele bazate pe principiul enunțat mai sus pot avea camere de măsură de tip inelar sau cilindrice. În figura 14-11 este reprezentat schematic un aparat cu cameră de măsură inelară. Gazul al cărui conținut de oxigen trebuie determinat este introdus în camera inelară 1 și circulă în sensul indicat de săgeți. Camera inelară are un tub transversal de sticlă 2 așezat orizontal. Pe acest tub se găsește o bobină de încălzire cu priză mediană. Cele două jumătăți ale bobinei (4 și 5) formează două brațe ale unei punți Wheatstone. O jumătate de bobină (4) se găsește într-un câmp magnetic, creat de un magnet permanent 3.

Se presupune că amestecul de gaze nu conține componenți paramagnetici, adică substanțe care se magnetizează. În acest caz, camera inelară fiind simetrică, gazul nu va fi atras în câmpul magnetic și nu va circula prin legătura transversală. Cele două înfășurări ale bobinei vor fi în acest caz încălzite la fel și puntea poate fi echilibrată prin varierea rezistenței reglabile R_5 . Dacă gazul de analizat conține molecule de O_2 , acestea fiind paramagnetice, se vor magnetiza și vor fi atrase de câmpul magnetic în interiorul tubului de sticlă 2. Însă, deoarece înfășurările bobinei încălzesc gazul atras, moleculele de O_2 își pierd proprietățile paramagnetice. Din această cauză, moleculele de O_2 ce se găsesc în câmpul magnetic vor fi împinse în afara acestuia de către moleculele de O_2 încă reci. Astfel, ia naștere un curent de O_2 de la stînga spre dreapta tubului transversal 2. Viteza acestui curent de molecule este proporțională cu conținutul de oxigen al gazului analizat. Acest curent de gaz are ca efect, pe de o parte, răcirea înfășurării 4, datorită schimbului de căldură între bobină și aerul rece și, pe de altă parte, încălzirea înfășurării 5. Datorită acestui fapt, rezistența înfășurării din stînga (4) scade, iar a celei din dreapta (5) crește. Datorită variației rezistențelor electrice ale celor două înfășurări puntea se dezechilibrează, iar deviația acului indicator al aparatului de măsurat 6 este practic proporțională cu conținutul de O_2 din gazul analizat. Aparatele bazate pe acest principiu se folosesc la analiza gazelor de ardere, a aerului de respirat etc.

c. **Metoda termică de analiză a gazelor** se bazează pe măsurarea conductivității termice a diferiților componenți sau pe măsurarea căldurii degajate prin arderea componenților combustibili. În figura 14-12 este prezentată schema electrică a unei punți pentru analiza gazelor prin măsurarea conduc-

tivității termice. Conductivitatea termică a gazelor depinde de temperatura acestora și variază în limite mari de la un gaz la altul. De exemplu, conductivitățile termice ale aerului, ale bioxidului de carbon (CO_2) și ale hidrogenului (H_2) la 0°C sînt respectiv următoarele: 57,6; 34 și 419 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$).

Analiza unui gaz prin metoda termică se bazează pe faptul că rezistența electrică a unui fir încălzit este cu atît mai mare, cu cît cantitatea de căldură evacuată este mai mică. Prin urmare, temperatura unui fir încălzit ce se găsește în curentul gazului analizat va depinde de căldura evacuată și deci de conductivitatea termică a gazului.

Temperatura unui fir se măsoară prin determinarea rezistenței lui electrice. Astfel, gazul de analizat acționează asupra unui fir de platină încălzit, iar un curent de aer (cu aceeași umiditate și temperatură) asupra altui fir de platină. Se notează rezistențele electrice ale celor două fire cu R_1 și respectiv cu R_2 . Rezistențele R_3 și R_4 sînt constante, iar rezistența R_5 este reglabilă. Dacă conductivitatea gazului de analizat nu diferă de cea a aerului, rezistențele R_1 și R_2 se răcesc la fel și puntea poate fi echilibrată. Pentru a evita diferențe de temperatură și de umiditate între gazul de analizat și aer, acestea sînt trecute prin apă înainte de a intra în aparatul de măsurat. Cînd gazul nu are aceeași conductivitate termică ca aerul (conține de exemplu mai mult CO_2), cele două rezistențe se răcesc în mod diferit. Prin urmare, rezistențele electrice R_1 și R_2 vor avea valori diferite, iar puntea se dezechilibrează. Tensiunea de dezechilibru, care este măsurată cu un aparat indicator, este proporțională cu conținutul de CO_2 din gazul de analizat. Cu ajutorul acestui aparat se determină conținutul de bioxid de carbon din gazele de ardere într-un interval de la 0 la 20%. Uneori, pentru mărirea sensibilității aparatului de măsurat, fiecare pereche de rezistențe din brațe opuse este acționată de același mediu. În acest scop, toate rezistențele sînt confecționate din același material și executate astfel încît să aibă coeficienți de temperatură egali.

În mod analog se măsoară și temperatura unui fir de platină, încălzit la o temperatură ce rezultă din arderea unor componenți combustibili.

Tot pe principiul măsurării conductivității termice a diferiților componenți sînt construite și *cromatografele de gaze*. Spre deosebire de analizoarele descrise, cromatograful nu permite o măsurare continuă a compoziției unui gaz, avînd o funcționare ciclică cu o perioadă ce variază între 5 și 30 min. În general, la cromatografe, gazul de analizat care se găsește într-o cameră de dozare este antrenat de un gaz purtător cu o conductivitate termică mult diferită de a tuturor componenților. Ca gaz purtător se folosește de obicei aerul uscat, hidrogenul (H_2), heliul (He) și alte gaze. Gazul purtător antrenează gazul de analizat într-o coloană de separație. În coloană are loc separarea componenților prin absorbție (absorbție diferită a componenților

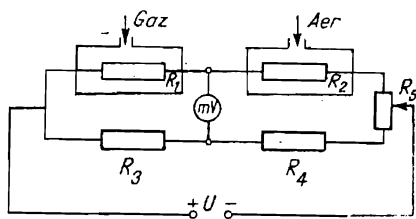


Fig. 14—12. Punte electrică pentru analiza gazelor prin metoda măsurării conductivității termice.

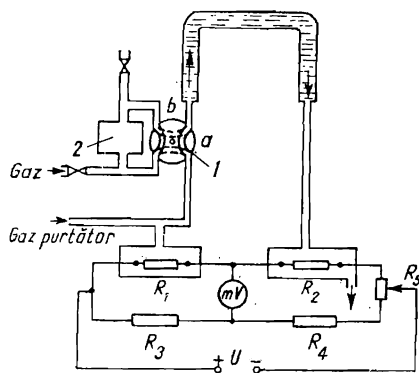


Fig. 14—13. Cromatograf de gaze.

netul de admisie 1 cu patru căi poate avea două poziții *a* și *b*. În poziția din figură, acest robinet permite gazului purtător să treacă direct prin coloană în camera de măsură, unde se găsește rezistența R_2 din fir de platină. În acest caz, puntea se echilibrează la zero, variind rezistența reglabilă R_5 . Când se efectuează analiza gazului de măsurat robinetul de admisie este trecut în poziția a doua, notată cu litera *b*. În acest caz, gazul purtător va antrena gazul de analizat, care se găsește în camera de dozare 2 în coloană, unde are loc o absorbție treptată a componentilor. Componentii care au o interacțiune intensă cu umplutura coloanei vor fi separați la început. Gazul purtător nu este absorbit și trece în camera de măsură. Dacă lungimea coloanei este suficient de mare, atunci toți componentii gazului analizat vor fi separați pînă la ieșirea din coloană. În continuare, componentii separați sînt trimiși la intervale egale de timp în camera de măsură. Pentru aceasta, după un program fix se conectează încălzitoare începînd din partea superioară a coloanei, creîndu-se astfel un cîmp de temperatură ce asigură desorbția componentilor. Desorbția se termină atunci cînd componentul cu cea mai mare interacțiune cu umplutura coloanei este antrenat spre camera de măsură. Cînd unul din componente părăsește coloana și intră în camera de măsură, puntea se dezechilibrează datorită fenomenului descris mai sus (referitor la conductivitatea termică). Tensiunea de dezechilibru este proporțională cu concentrația componentului respectiv în gazul analizat. Dacă se înregistrează variația în timp a tensiunii de dezechilibru a punții, se obține o diagramă numită *cromatogramă* (fig. 14-14). Timpul înscris pe abscisă dă indicații asupra felului componentului (în ordinea desorbției componentilor), iar tensiunea de dezechilibru din ordonată asupra concentrației acestuia. Deoarece două componente ale gazului de aceeași concentrație pot avea conductivități termice diferite, rezultă că acestea vor dezechilibra în mod diferit puntea. Prin urmare este necesară o etalonare separată a aparatului de măsurat pentru fiecare component.

d. **Spectroscopia de masă.** *Spectrometrul de masă* (fig. 14-15) este format dintr-un electromagnet 1 care creează un cîmp magnetic puternic, o cameră 2

pe o substanță solidă) sau prin distribuție (solubilitate diferită a componentelor într-un lichid). Componentele separate sînt conduse apoi pe rînd într-o cameră de măsură.

În figura 14-13 este reprezentat schematic un cromatograf de gaze. Gazul purtător ce provine dintr-o butelie de presiune circulează în mod continuu. Este necesar ca debitul și presiunea gazului purtător să fie menținute constante cu ajutorul unor robinete. O parte a gazului purtător străbate camera de comparație unde se găsește rezistența electrică R_1 confecționată din fir de platină, iar altă parte străbate coloana de separație. Robi-

În care gazul analizat este ionizat, un amplificator electronic de tensiune continuă *A*, precum și un înregistrator *I*. Gazul este ionizat prin bombardare cu un fascicul de electroni 3. Ionii produși prin ionizare sînt accelerați de către un electrod 4 în direcția cîmpului magnetic, unde sînt deviați în

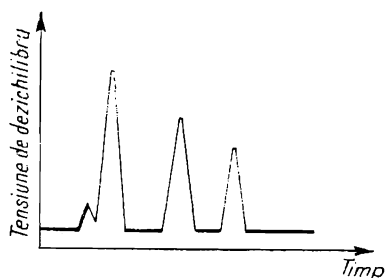


Fig. 14—14. Cromatograma unui amestec.

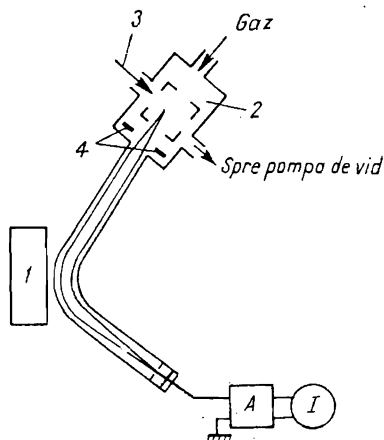


Fig. 14—15. Spectrometru de masă.

funcție de masa lor. Dacă intensitatea cîmpului magnetic variază în timp în anumite limite, se poate face astfel încît în mod succesiv să fie transmis la intrarea amplificatorului curentul electric, datorită ionilor de o anumită masă. În acest caz, la ieșirea amplificatorului vor exista în mod succesiv semnale proporționale cu concentrația ionilor de o anumită masă în gazul analizat. Dacă aceste semnale sînt înregistrate, se obține o diagramă numită *spectrogramă*, care are același aspect ca și cromatograma.

e. **Iradierarea radioactivă.** Proprietatea esențială a radiațiilor radioactive pe care se bazează utilizarea lor în analiza gazelor este aceea de a ioniza. Ionizarea constă în ciocnirea unei particule α sau β sau a unei cuante γ cu atomii gazului analizat. În urma acestor ciocniri, electronii primesc suficientă energie pentru a rupe legătura cu atomii. Prin urmare, prin ionizare apar ioni pozitivi și electroni liberi. Dacă intensitatea sursei de radiație radioactivă și tensiunea electrică aplicată pentru dirijarea ionilor sînt menținute constante, atunci curentul electric care apare va depinde de compoziția amestecului de gaze analizat. Radiațiile α au cea mai mare putere de ionizare, dar au o putere de pătrundere mică. Radiațiile γ au un efect de ionizare foarte redus. Din această cauză, pentru analiza gazelor cu ajutorul radiațiilor radioactive se folosesc surse de radiații β .

În figura 14-16 este prezentată schema simplificată a unui analizor de gaze, bazat pe iradierea radioactivă. În două camere de ionizare 1 și 2 sînt introduse gazul de comparație și gazul de analizat. Prin iradiere radioactivă, cele două gaze se ionizează și apare un curent electric. În fiecare cameră de ionizare, între pereții camerei și un electrod se aplică o tensiune continuă. Prin conectarea în opoziție a celor două tensiuni se obține ca cei doi curenți

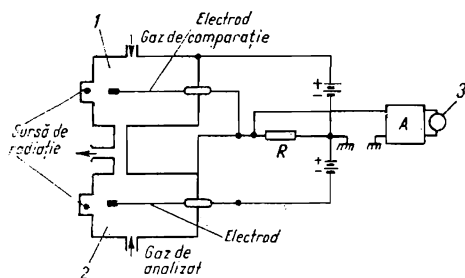


Fig. 14—16. Analizor de gaze folosind radiații radioactive.

redușă și în special pentru amestecuri de numai două gaze (de exemplu, argon și amoniac).

Montarea analizoarelor de gaze trebuie efectuată astfel încât să se asigure îndeplinirea următoarelor condiții: gazul să fie la o anumită suprapresiune, să aibă un debit constant la trecerea prin analizor, să fie evacuată apa condensată și să fie înlăturați componenții gazoși corosivi, în raport cu elementele componente ale analizorului de gaze.

Pentru a menține gazul la o anumită presiune și la un anumit debit se folosesc ventile de reglare și aparate de măsurat pentru verificări curente. Separarea apei din gazul analizat se face cu separatoare de apă, care reprezintă vase de răcire a gazului. Acestea sînt montate în punctul cel mai de jos al instalației, iar apa condensată este evacuată. Înlăturarea componenților gazoși corosivi se realizează cu filtre de absorbție. De exemplu, pentru înlăturarea componenților gazoși Cl_2 , NO_2 se folosește ca absorbant NaOH . Unele analizoare de gaze sînt confecționate din materiale rezistente la coroziune și nu mai necesită înlăturarea componenților gazoși corosivi.

de ionizare să fie de sens contrar la trecerea prin rezistența R . Prin urmare, pe rezistența electrică R rezultă o cădere de tensiune, care este transmisă la amplificatorul electronic A , la ieșirea căruia este conectat un aparat de măsurat 3. Etalonarea acestui analizor se face utilizînd un amestec de gaze a cărui compoziție este cunoscută.

Pînă în prezent, metoda de analiză a gazelor prin iradiere radioactivă a fost utilizată pe scară

Capitolul XV

MĂSURAREA NIVELULUI LICHIDELOR

A. GENERALITĂȚI

În multe instalații industriale, măsurarea nivelului lichidelor are un rol foarte important. Cunoașterea nivelului unui lichid într-o instalație industrială permite o exploatare în condiții normale și evitarea avariilor. De exemplu, la un cazan de aburi măsurarea nivelului apei constituie o problemă importantă și de mare răspundere. Într-un cazan, întreruperea alimentării cu apă în timpul funcționării duce la golirea acestuia în câteva minute. Din aceste motive, în instalațiile unde nivelul unui lichid are o mare importanță, aparatele de măsurat au ca scop măsurarea și semnalizarea depășirii anumitor limite ale nivelului. În unele instalații automatizate semnalul de la traductorul de nivel este utilizat în vederea menținerii constante a nivelului, cu ajutorul unui sistem automat de reglare (de stabilizare).

Măsurarea nivelului unui lichid se poate efectua prin mai multe metode. Alegerea metodei de măsurare depinde de următorii factori principali: intervalul de variație a nivelului, proprietățile fizice și chimice ale lichidului și condițiile de exploatare (mediu exploziv, corosiv etc.). În prezent, cele mai utilizate metode de măsurare sînt următoarele: cu sticlă de nivel, cu plutitor, pneumatice, electrice (capacitive, rezistive etc.), cu radiații radioactive și cu ultrasunete.

B. NIVELMETRE BAZATE PE PRINCIPIUL VASELOR COMUNICANTE

a. **Sticla de nivel.** Cea mai simplă metodă pentru măsurarea nivelului unui lichid constă în utilizarea sticlei de nivel. Funcționarea acestui nivelmetru (aparat pentru măsurarea nivelului) se bazează pe principiul vaselor comunicante. Sticla de nivel (fig. 15-1) este formată dintr-un tub conectat la partea inferioară a vasului unde se măsoară nivelul. Tubul poate fi confec-

ționat numai din sticlă sau din sticlă și metal. Dacă vasul este un rezervor deschis, atunci celălalt capăt al tubului este liber. În cazul vaselor cu lichide sub presiune, capătul tubului se conectează la partea superioară a vasului.

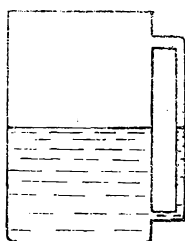


Fig. 15—1. Măsurarea nivelului folosind sticle de nivel.

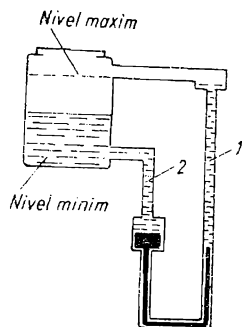


Fig. 15—2. Măsurarea nivelului folosind manometrul diferențial.

b. **Manometrul diferențial.** Tot pe principiul vaselor comunicante se bazează și indicatoarele de tipul manometrelor diferențiale. Aceste aparate constau dintr-un manometru diferențial, umplut cu un lichid cu greutate specifică mare (de exemplu, mercur).

În figura 15-2 este prezentată schema de măsurare a nivelului de apă la un cazan cu ajutorul unui manometru diferențial. Dacă în tubul 1 se găsește același lichid ca în vas, atunci la poziția maximă a nivelului suprafețele mercurului sînt la același nivel. Dacă nivelul lichidului din vas coboară ca în exemplul ilustrat în figură, atunci manometrul diferențial va indica o diferență de nivel. În cazul cînd tubul 1 se umple cu un lichid diferit de cel din vas, la poziția maximă a nivelului lichidului din vas suprafețele mercurului nu vor fi la același nivel, deoarece lichidele au greutăți specifice diferite.

Pe același principiu se construiesc și traductoare inductive diferențiale. Pentru aceasta, cele două tuburi (1, 2) sînt conectate la două camere, care au ca perete comun o membrană elastică, legată printr-o tijă cu un miez magnetic (v. fig. 12-7).

C. NIVELMETRE CU PLUTITOR

Traductoarele de nivel cu plutitor sînt de obicei traductoare complexe, cu transformare succesivă a mărimilor: ele conțin un plutitor care sesizează variațiile de nivel, un organ intermediar mecanic, care transformă și transmite deplasarea mecanică, și un traductor electric de deplasare sau de alt tip.

În figura 15-3 este prezentat un traductor rezistiv pentru măsurarea nivelului. Plutitorul 1 este legat printr-un lanț care trece peste roata 2, prevăzută cu o contragreutate 3. Plutitorul determină o anumită poziție unghiulară a roții față de lanț, care printr-un sistem de transmisie cu roți dințate 4 schimbă poziția cursorului rezistenței reglabile 5. În locul rezistenței cu cursor poate fi utilizată o bobină cu un miez magnetic, a cărui poziție este determinată de plutitor. În acest caz se obține un traductor inductiv de nivel. Valoarea rezistenței sau a impedanței bobinei este în funcție de poziția plutitorului și poate fi măsurată cu ajutorul unei punți electrice. Dacă puntea nu este echilibrată, semnalul electric obținut poate fi transmis la un adaptor, pentru obținerea unui semnal unificat.

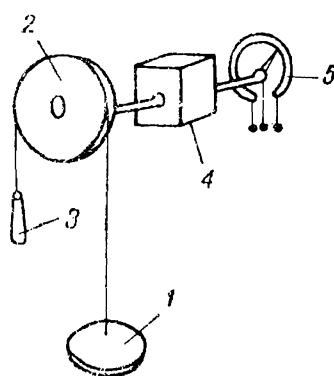


Fig. 15—3. Nivelmetru cu plutitor.

Pe principiul măsurării nivelului cu ajutorul unui plutitor se pot construi și *semnalizatoare de nivel*. Folosind un asemenea dispozitiv, în cazul depășirii unei anumite limite a nivelului, se închide circuitul electric al unei lămpi de semnalizare. Pentru aceasta, sistemul de transmisie a poziției plutitorului închide un contact electric din circuitul de alimentare al lămpii de semnalizare. Nivelul pentru care are loc semnalizarea poate fi fixat cu ajutorul unor pîrghii sau roți dințate.

D. NIVELMETRE PNEUMATICE

Schema unui nivelmetru pneumatic este prezentată în figura 15-4. Pentru măsurarea nivelului într-un vas deschis 1 se folosește aer comprimat sau un gaz inert, care prin țeava 2 barbotează stratul de lichid. Reglarea consumului de aer comprimat sau gaz inert se face prin intermediul robinetului 3. Coloana de lichid exercită o anumită presiune asupra secțiunii transversale a țevii 2 prin care iese aerul. Prin urmare, pentru poziții constante ale robinetelor 3 și 5 debitul de aer care iese prin stratul de lichid va depinde de grosimea acestuia. Presiunea din conductă se măsoară cu ajutorul unui manometru indicator 4 și este funcție de grosimea stratului de lichid, deci funcție de nivel. Variația presiunii în conductă se datorește căderii de presiune pe elementul de laminare 3, în funcție de

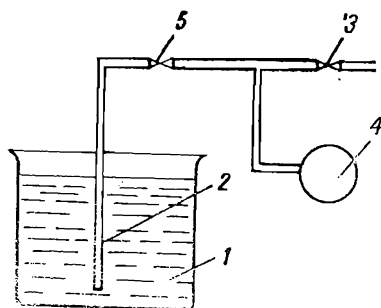


Fig. 15—4. Nivelmetru pneumatic.

debitul de aer ce iese în atmosferă. Cu cât debitul de aer ce iese în atmosferă este mai mare, cu atât presiunea dintre cele două elemente de laminare este mai mică.

Această metodă de măsurare a nivelului se poate utiliza și în cazul când lichidul se găsește într-un vas închis. În acest caz se folosește un manometru diferențial, la care este conectat un tub ca în figura 15-4, iar al doilea tub este conectat în partea superioară a vasului. Utilizarea în acest caz a metodei prezentate este limitată de la o anumită valoare a presiunii în partea superioară a vasului.

Nivelmetrele pneumatice necesită o verificare permanentă și sînt relativ complicate. Din această cauză, aceste nivelmetre se folosesc în general pentru măsurarea nivelului la lichide vîscoase și corosive (atunci cînd nu pot fi utilizate alte tipuri de nivelmetre).

E. NIVELMETRE ELECTRICE

Nivelmetrele electrice se bazează pe măsurarea conductivității sau a capacității electrice. În acest scop, în lichidul al cărui nivel trebuie măsurat se cufundă unul sau doi electrozi. Rezistența electrică (la electroliți) sau capacitatea (la lichide dielectrice) dintre cei doi electrozi depinde de nivelul lichidului; ele pot fi măsurate cu ajutorul unui montaj în punte.

În figura 15-5 este prezentat schematic un rezervor la care nivelul se măsoară cu ajutorul unui traductor capacitiv. Traductorul este format dintr-un electrod care prezintă următoarele capacități: C_1 (capacitatea dintre electrod și capacul rezervorului), C_2 (capacitatea părții umplute), C_3 (capacitatea părții neumplute). Deoarece lichidele cu care se umple rezervorul au o constantă dielectrică mai mare decît aerul, capacitatea totală a condensatorului format între electrod și vas crește cu înălțimea de umplere. Condensatoarele fiind conectate în paralel, capacitatea totală C este egală cu:

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (15-1)$$

În funcție de forma și dimensiunile vaselor unde trebuie măsurat nivelul unui lichid, electrodul poate fi în formă de sîrmă, tub sau bară. Dacă lichidul din vas este rău conducător de electricitate și necorosiv, se folosește un electrod neizolat. Cînd lichidul conține acizi, electrodul trebuie să fie izolat. Dacă lichidul are o conductivitate electrică relativ mare, atunci capacitatea dintre electrod și pereții vasului va fi scurtcircuitată. În acest caz, electrodul fiind izolat, numai capacitatea între electrod și suprafața izolației acestuia va varia cu înălțimea.

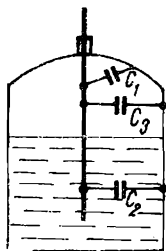


Fig. 15—5. Traductor capacitiv de nivel.

Pentru măsurarea variației capacității, în unele instalații se folosesc circuite de rezonanță ali-

mentate cu tensiune de înaltă frecvență. Deoarece capacitățile rezervorului gol și plin diferă mult, traductoarele capacitive de nivel au o sensibilitate mare.

F. NIVELMETRE CU RADIAȚII RADIOACTIVE

Aceste nivelmetre sînt recomandate în special în cazurile în care se dorește a se evita stabilirea vreunei treceri — mecanice sau electrice — între interiorul și exteriorul rezervorului în care trebuie măsurat nivelul lichidului (lichide toxice, inflamabile, explozive, corosive etc.).

Măsurarea nivelului unui lichid cu ajutorul radiațiilor radioactive se bazează pe două principii.

— Primul principiu utilizează dependența dintre intensitatea radiației γ a unui izotop radioactiv și distanța între emițător și receptor. Pentru aceasta se folosește un plutitor (montat de obicei pentru centrare într-un tub vertical), pe care este fixat un preparat care proiectează în sus un fascicul îngust de radiații. Pe vas este montat receptorul (un contor Geiger), al cărui semnal este amplificat și transmis la un aparat de măsurat gradat în unități corespunzătoare.

— Al doilea principiu utilizează gradul diferit de absorbție a radiațiilor γ de către lichide și aer. În acest scop, între sursa de radiații și contor se plasează vasul cu lichid al cărui nivel trebuie măsurat. În figura 15-6, *a* este prezentată o metodă pentru semnalizarea umplerii și golirii unui rezervor

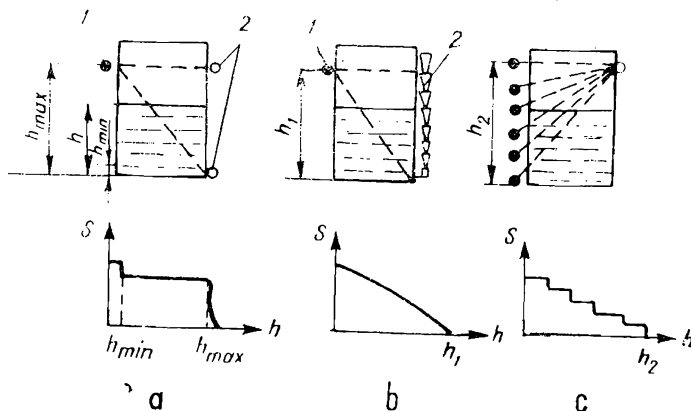


Fig. 15—6. Măsurarea nivelului folosind radiații radioactive.

cu ajutorul a două fascicule de radiații provenite de la sursa 1. Două contoare Geiger 2, montate în partea opusă a rezervorului, sînt așezate la înălțimea h_{max} și h_{min} în direcția acestor fascicule. După cum se vede din figură, frecvența semnalelor de la ieșirea celor două contoare depinde de înălțimea h

a lichidului din rezervor. Deoarece un contor Geiger dă impulsuri electrice de o anumită frecvență, frecvența semnalului total de la cele două contoare este mai mare decât frecvența semnalului de la un singur contor. Când lichidul are un nivel sub valoarea minimă a înălțimii la care este montat un contor (h_{min}), semnalul total are o frecvență mare, deoarece ambele fascicule trec prin aer. Când nivelul lichidului se află între valoarea maximă (h_{max}) și cea minimă (h_{min}) a înălțimii la care sînt montate contoarele, frecvența semnalului total este aproximativ constantă, însă mai mică, deoarece acum un fascicul trece prin lichid. La depășirea nivelului maxim la care este montat celălalt contor (h_{max}), frecvența semnalului total se micșorează brusc, deoarece ambele fascicule trec prin lichid. Creșterea și reducerea frecvenței impulsurilor electrice în funcție de nivelul lichidului poate fi utilizată pentru acționarea unor relee, care închid un circuit electric de semnalizare.

Pentru măsurarea continuă a nivelului se pot utiliza mai multe metode de montare a surselor de radiație și a contoarelor. În figura 15-6, *b* se prezintă o metodă de măsurare a nivelului, folosind o singură sursă de radiații radioactive 1 și mai multe contoare 2. Folosind această metodă, după cum se vede din grafic, se obține o frecvență de semnale *S* ce depinde aproximativ liniar de înălțimea lichidului *h*.

În figura 15-6, *c* este prezentată o metodă care utilizează mai multe surse de radiații și un singur contor, însă la care, după cum reiese din grafic, frecvența semnalului variază în trepte, în raport cu înălțimea *h* a coloanei de lichid.

Pentru numărarea impulsurilor contoarelor Geiger se folosesc numărătoare electronice și dispozitive cu afișarea cifrică a rezultatului. Aceste numărătoare electronice memorează numărul de impulsuri care sosesc într-un interval de timp constant de la contoarele Geiger.

Utilizarea metodelor radioactive pentru măsurarea nivelului sînt justificate în cazul cînd prin aceasta se asigură o creștere a productivității muncii, o îmbunătățire a calității produsului sau o micșorare a procentului de rebuturi. În caz contrar se folosesc metode mai puțin complexe, care nu necesită cheltuieli suplimentare de montaj și de întreținere.

G. NIVELMETRE CU ULTRASUNETE

Pentru măsurarea nivelului unui lichid cu ajutorul ultrasunetelor sursa este montată deasupra vasului, iar undele sînt reflectate de un plutitor special. În vederea măsurării nivelului, adică a distanței dintre sursă și plutitor, se poate folosi timpul de parcurgere a acestei distanțe de către ultrasunete, sau fenomenele de rezonanță dintre undele emise și undele reflectate.

În cazul cînd se folosește timpul de parcurgere a distanței de către ultrasunete, metoda este aceeași ca în cazul măsurării debitului (v. cap. XII).

Dacă se folosește metoda bazată pe fenomenul de rezonanță dintre undele emise și undele reflectate, este necesară o sursă de ultrasunete cu o lungime de undă variabilă. O asemenea sursă se obține prin alimentarea unei celule piezoelectrice, cu o tensiune de frecvență variabilă. Când unda reflectată de plutitor este în aceeași fază cu unda transmisă de sursă, distanța dintre sursă și plutitor este un multiplu al lungimii de undă. Un dispozitiv special sesizează fenomenul de rezonanță al undelor reflectate și emise. Pentru măsurarea nivelului se variază frecvența ultrasunetelor până la apariția fenomenului de rezonanță.

Nivelmetrele construite după acest principiu pot măsura nivele cuprinse între 0 și 5 m și asigură o precizie bună. Din motive de simplitate, dispozitivul pentru sesizarea fenomenului de rezonanță este de obicei acustic.