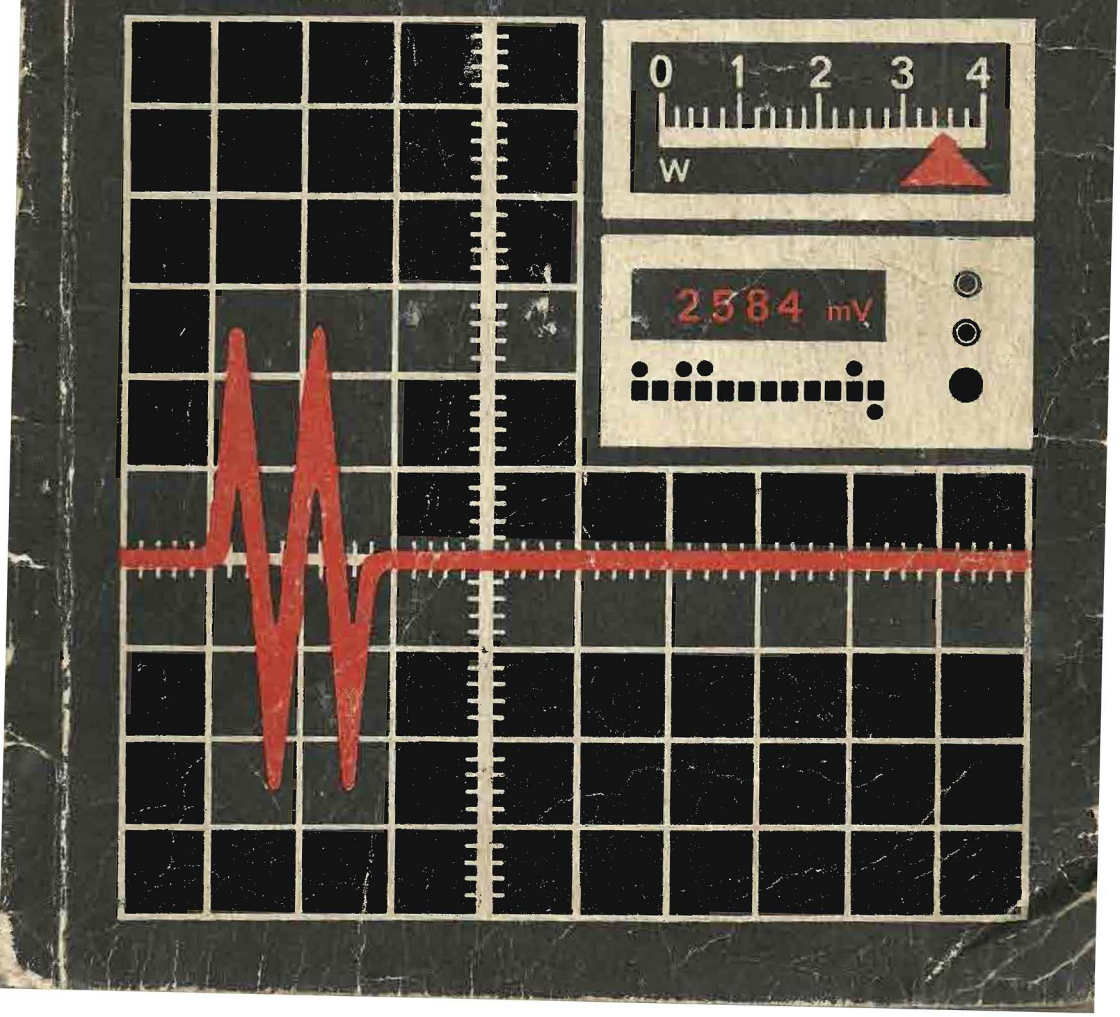
RADU DORDEA

Măsurări electrice și electronice

Manual pentru licee cu profil electrotehnic, anul II



Ing. RADU DORDEA

Măsurări electrice și electronice

Manual pentru licee cu profil electrotehnic, anul II



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, BUCUREȘTI

Manualul a fost revizuit conform programei școlare aprobate de Ministerul Educației și Învățământului cu nr. 52684/73

Redactor: ing. *D. Hrincu*
Tehnoredactor: *Rusu Virgilia*
Grafician: *Sîrbu Nicolae*

CAPITOLUL I

Măsurări și aparate de măsurat electrice

A. Măsurări, mijloace și metode de măsurare

● **Măsurări.** În electrotehnică și electronică intervin numeroase mărimi fizice ca tensiuni, curenți, puteri, energii, rezistențe etc., care se caracterizează prin dimensiuni fizice și anumite raporturi între ele. Aprecierea cantitativă a proprietăților acestor mărimi se realizează prin **măsurare.**

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

$$\alpha = \frac{A}{a};$$

de unde :

$$\boxed{A = \alpha\, a,}$$

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.*

Pentru a se măsura o mărime trebuie să fie stabilită *unitatea de măsură* a acelei mărimi și să existe *mijloacele de măsurare* care să permită compararea mărimii cu unitatea ei, prin anumite *metode de măsurare.*

Unitatea de măsură. Unitatea de măsură trebuie să fie de aceeași natură cu mărimea de măsurat și să poată fi reprodusă fizic, pentru a se putea compara cu ea mărimile de măsurat.

Dimensiunea unității poate fi aleasă oarecare, dar o dată acceptată ea trebuie să rămînă neschimbată.

Totalitatea unităților de măsură folosite într-un domeniu oarecare de măsurare se numește **sistem de unități.** Unitățile de măsură se stabilesc în fiecare țară prin legi speciale. Generalizarea unităților de măsură pe scară mondială se reglementează prin acord internațional.

Sistemul de unități de măsură legal și obligatoriu în Republica Socialistă România este *Sistemul Internațional de Unități de Măsură* (cu simbolul SI), care a fost adoptat pe scară internațională în 1960 la a XI-a Conferință Generală de Măsuri și Greutăți de la Paris. Unitățile fundamentale ale acestui sistem (din care derivă și celelalte unități) sînt *metrul* (m) pentru lungime, *kilogramul* (kg) pentru masă, *secunda* (s) pentru timp și *amperul* (A) pentru curentul electric.

● **Mijloace de măsurare.** *Mijloacele de măsurare sînt mijloacele tehnice cu ajutorul cărora se determină cantitativ mărimea de măsurat.*

Se disting două categorii de mijloace de măsurare :

— **măsuri,** care materializează unitățile de măsură sau valorile multiple sau submultiple ale acestora ;

— **aparate de măsurat,** care servesc la compararea directă sau indirectă a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură.

În funcție de rolul și precizia lor, mijloacele de măsurare se împart în :

— *mijloace de măsurare de lucru,* care servesc la măsurările curente și care la rîndul lor pot fi *mijloace de măsurare de laborator* (cu precizie mai mare) și *mijloace de măsurare tehnice* (cu precizie mai mică) ;

— *mijloace de măsurare etalon,* sau *etaloane,* care materializează unitățile de măsură cu precizia maximă, le păstrează și le transmit mijloacelor de măsurare de precizie inferioară.

● **Metode de măsurare.** *Metoda de măsurare reprezintă modul de comparare a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură.*

Metodele de măsurare diferă între ele după : modul de obținere a valorii mărimii măsurate, forma de indicare a valorii măsurate și precizia de măsurare.

● **După modul de obținere a valorii mărimii măsurate** se disting :

— *metode de măsurare directe,* în care valoarea mărimii de măsurat se obține prin măsurarea nemijlocită a mărimii de măsurat, folosindu-se aparate de măsurat sau măsuri ; de exemplu, măsurarea tensiunii cu voltmetrul ;

— *metode de măsurare indirecte,* în care valoarea mărimii de măsurat se obține prin calcul din valorile măsurate direct ale altor mărimi, de care este legată printr-o anumită relație fizică ; de exemplu, determinarea valorii rezistenței electrice *(R)* prin calcul, cu ajutorul legii lui Ohm $\left(R = \frac{U}{I}\right)$, din valorile măsurate direct ale tensiunii *(U)* și curentului *(I).*

Metodele de măsurare directă sînt cele mai numeroase. În funcție de tehnica măsurării, la rîndul lor aceste metode se împart în două grupe :

— *metode de citire,* în care valoarea mărimii de măsurat se obține prin citirea directă a indicației unui aparat de măsurat etalonat în unități ale mărimii de măsurat ;

— *metode de comparație,* în care valoarea mărimii de măsurat se obține prin compararea directă a acesteia cu una sau mai multe măsuri.

Metodele de comparație diferă între ele în funcție de modul în care se compară mărimile de măsurat cu măsurile. Se deosebesc astfel :

— *metoda de zero (sau de compensație),* în care mărimea de măsurat se compară cu o măsură sau mărime cunoscută de aceeași natură, care acționînd simultan asupra aparatului de măsurat se variază pînă compensează (reduce la zero) efectul mărimii de măsurat ; cînd efectele celor două mărimi asupra aparatului de măsurat se compensează (echilibrează), indicația acestuia este zero și cele două mărimi sînt egale sau proporționale ; un exemplu de metodă de zero este măsurarea maselor cu balanța cu brațe sau măsurarea tensiunii electrice prin compensare cu tensiunea unui element etalon cunoscut ;

— *metoda diferențială,* în care comparația se realizează măsurîndu-se diferența dintre mărimea de măsurat și măsura sau mărimea cunoscută care acționează simultan asupra aparatului de măsurat ; precizia acestei metode este cu atît mai mare cu cît diferența dintre cele două mărimi este mai mică ;

— *metoda de substituție,* în care mărimea de măsurat se substituie în montajul de măsurare cu măsura sau mărimea de comparație cunoscută, care se variază pînă cînd se obține același efect asupra aparatului de măsurat ca și în cazul mărimii de măsurat (indicația aparatului este aceeași), cînd cele două mărimi sînt egale.

● **După forma de indicare a valorii măsurate,** metodele de măsurare se împart în :

— *măsurări analogice,* în care mărimea de măsurat se măsoară în mod continuu, valoarea acesteia (dată de indicatorul aparatului de măsurat) urmărind continuu variația mărimii de măsurat ;

— *măsurări numerice* (discrete), în care mărimea de măsurat este descompusă (cuantată) în montajul de măsurare în mărimi discrete, care se măsoară numai la anumite intervale de timp, valoarea ei (indicată de aparatul de măsurat sub formă cifrică) urmărind în mod discontinuu variația, de obicei continuă, a mărimii de măsurat.

● **După precizia de măsurare** se deosebesc :

— *măsurări de laborator,* în care se folosesc metode și mijloace de măsurare de mare precizie și se determină erorile de măsurare ;

— *măsurări industriale,* care se execută cu metode și mijloace de măsurare mai puțin precise și fără a ține seama de erorile de măsurare.

B. Aparate de măsurat electrice

1. Principiul de funcționare al aparatelor de măsurat electrice și elemente componente

Aparatele de măsurat electrice *sînt mijloacele de măsurare care permit determinarea cantitativă a mărimii fizice de măsurat prin transformarea acesteia într-o mărime perceptibilă, prin intermediul unui semnal electric.*

● **Principiul de funcționare al 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, folosindu-se energia cîmpului magnetic sau electric sau a curentului electric, se obține mărimea perceptibilă care este deplasarea unui sistem mecanic mobil sau un semnal numeric.

Între mărimea perceptibilă și mărimea fizică de măsurat trebuie să existe o corespondență bine definită. Această corespondență este determinată, pe de o parte de dependența mărimii perceptibile α de semnalul electric intermediar Y :

$$\alpha = f_1 (Y),$$

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

$$Y = f_2 (X)$$

Eliminîndu-se din cele două ecuații mărimea intermediară Y, se obține *relația de corespondență dintre mărimea de măsurat X și mărimea perceptibilă α, denumită* **caracteristică de transfer statică** *sau* **caracteristica statică** *a aparatului de măsurat :*

$$\alpha = f_1 [f_2 (X)] = f_3 (X)$$

Caracteristica statică a aparatelor de măsurat poate fi liniară sau neliniară, în funcție de elementele constructive ale acestora. Practic, caracteristicile statice ale tuturor elementelor sînt mai mult sau mai puțin neliniare.

Fiecărei valori a mărimii de măsurat X, în anumite condiții exterioare, trebuie să-i corespundă o singură valoare a mărimii perceptibile bine determinată α. În caz contrar, indicațiile aparatului sînt greșite. Pentru aceasta, este necesar ca mărimea perceptibilă să depindă numai de mărimea de măsurat, ca ambele funcții de transfer să fie uniforme, ca variația parametrilor elementelor constructive a aparatului, 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.

● **Elementele componente ale aparatelor de măsurat electrice.** *Orice aparat de măsurat electric se compune dintr-un traductor și un dispozitiv de măsurat* (fig. 1.1).

Traductorul *are rolul de a transforma mărimea fizică de măsurat X într-un semnal electric intermediar Y, care de obicei este curentul sau tensiunea electrică.*

Traductoarele electrice sînt extrem de diverse ca semnale de ieșire : cele *analogice* furnizează un semnal continuu variabil cu mărimea măsurată (variația unei impedanțe, o tensiune, variația frecvenței sau fazei unei oscilații sinusoidale, variația debitului sau duratei unor impulsuri etc.) ; cele *numerice* furnizează un semnal discontinuu, o succesiune de impulsuri sau o combinație de tensiuni care după un anumit cod reprezintă valoarea numerică a mărimii măsurate.

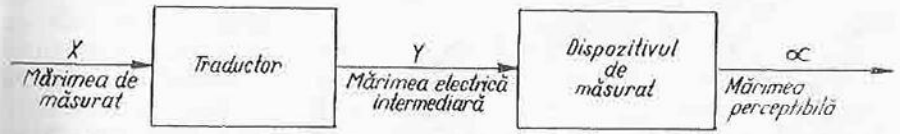


Fig. 1.1. **Schema funcțională generală a aparatelor de măsurat electrice.**

La unele aparate de măsurat electrice traductorul poate lipsi. Pentru măsurarea temperaturilor, de exemplu, se folosește un traductor electric (termorezistență sau termocuplu), pe cînd pentru măsurarea tensiunii sau curentului electric nu este necesar traductorul.

Dispozitivul de măsurat *reprezintă partea activă a aparatului asupra căreia acționează semnalul electric care este prelucrat, dînd naștere mărimii perceptibile, cu ajutorul căreia se determină valoarea mărimii măsurate.* Mărimea perceptibilă poate fi deplasarea lineară sau unghiulară a unui sistem mecanic mobil sau un semnal codificat, de obicei electric, exprimat sub formă numerică.

2. 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 de funcționare utilizate. Aceste două elemente constituie principalele criterii care stau la baza clasificării aparatelor de măsurat electrice.

După metoda de măsurare, aparatele de măsurat electrice se împart în două grupe :

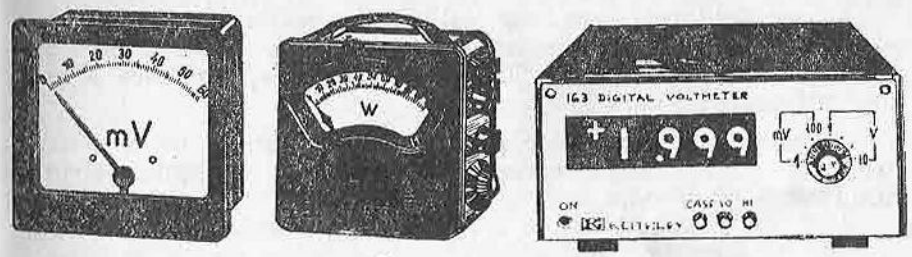
— *aparate indicatoare,* care furnizează valoarea mărimii măsurate direct sub forma unei indicații vizuale pe un dispozitiv de citire ;

— *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 două categorii :

— *aparate analogice,* în care semnalul electric acționează dispozitivul de măsurat în mod continuu (în fiecare moment), valoarea mărimii de măsurat fiind indicată sub forma deplasării unghiulare sau liniare a indicatorului unui echipaj mobil în fața unei scări gradate în unități ale mărimii de măsurat (fig. 1.2, *a* și *b*) ; această categorie de aparate cuprinde marea majoritate a aparatelor indicatoare ;

— *aparate numerice,* în care semnalul electric este discretizat (cuantat în timp) acționînd discontinuu (la anumite intervale de timp) dispozitivul de măsurat, valoarea mărimii de măsurat fiind afișată sub formă numerică (fig. 1.2, *c*) ; în această categorie intră aparatele indicatoare numerice, dar pot fi cuprinse și aparatele comparatoare neautomate cu rezistențe decadice (de exemplu : punți, compensatoare etc.) deoarece cu ajutorul acestora se efectuează măsurări discrete, iar mărimea măsurată se transformă în anumite valori ale decadelor rezistențelor, exprimîndu-se sub formă numerică.



a *b* *c*

Fig. 1.2. **Aparate de măsurat electrice :**
a, b — analogice ; c — numeric.

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.

3. 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 sînt :

— *precizia,* care exprimă gradul de exactitate al rezultatelor în măsurări ;

— *fidelitatea,* care este proprietatea aparatului de a avea o variație cît mai mică a indicațiilor la diferite măsurări ale aceleiași mărimi ;

— *justețea,* care este proprietatea aparatului de a da indicații apropiate de valoarea efectivă a mărimii măsurate ;

— *sensibilitatea*, care este calitatea aparatului de a percepe cele mai mici variații ale mărimii măsurate ; se exprimă prin raportul dintre variația indicației și variația corespunzătoare a mărimii măsurate ;

— *mobilitatea*, care este proprietatea aparatului de a avea o inerție cît mai mică, urmărind cît mai rapid variațiile mărimii măsurate.

C. Erori de măsurare

Prin efectuarea unei măsurări, oricît de precise ar fi mijloacele de măsurare și metodele de măsurare, nu se poate obține niciodată *valoarea adevărată* a mărimii de măsurat. Între valoarea obținută prin măsurare și valoarea adevărată a mărimii măsurate există o diferență care se numește **eroare de măsurare.**

Cauzele care determină erorile și caracterul lor sînt extrem de diferite. Erorile se datoresc imperfecțiunii mijloacelor de măsurare sau metodelor de măsurare, inconstanței condițiilor în care se efectuează măsurarea, influenței mediului exterior (temperatura, umiditatea, cîmpuri magnetice și electrice etc.), 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.

● **Erorile măsurărilor.** Valoarea adevărată a unei mărimi neputînd fi determinată niciodată, definirea erorilor de măsurare se face prin referirea la o *valoare de referință* X_0, obținută cu o precizie superioară valorii măsurate, cu mijloace de măsurare etalon. În acest fel se deosebesc :

Eroarea de măsurare (sau **eroarea absolută**) Δ **a unei mărimi** *reprezintă diferența dintre valoarea măsurată* x *a mărimii și valoarea de referință* X_0 *:*

$$\boxed{\Delta = x - X_0.}$$

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

Este evident că, pentru aceeași valoare a mărimii măsurate, cu cît eroarea de măsurare este mai mică, cu atît măsurarea este mai precisă. Pentru diferite valori de mărimi măsurate eroarea de măsurare nu exprimă însă gradul de precizie al măsurării ; acesta este dat de *eroarea relativă.*

Eroarea relativă Δ_r *este raportul dintre eroarea de măsurare* Δ *și valoarea de referință* X_0 *a mărimii măsurate :*

$$\boxed{\Delta_r = \frac{\Delta}{X_0} = \frac{x - X_0}{X_0}}$$

Eroarea relativă, fiind raportul a două mărimi de aceeași natură, este un număr și se exprimă de obicei în procente (prin înmulțirea expresiei lui Δ_r cu 100). Cu cît eroarea relativă este mai mică, cu atît măsurarea este mai precisă.

● **Erorile aparatelor de măsurat electrice.** Valoarea indicată de un aparat de măsurat se deosebește de valoarea adevărată a mărimii măsurate datorită imperfecțiunilor sale constructive, influenței mediului exterior sau greșelilor de citire și manipulare a operatorului.

Eroarea de indicație Δ_i **a unui aparat de măsurat** *reprezintă diferența dintre valoarea indicației* x_i *a aparatului și valoarea de referință* X_0 *a mărimii măsurată cu un aparat mult mai precis* (aparat etalon) :

$$\boxed{\Delta_i = x_i - X_0}$$

Corecția de indicație C reprezintă eroarea de indicație luată cu semn schimbat :

$$\boxed{C = -\Delta_i = X_0 - x_i}$$

Adunîndu-se corecția la valoarea indicației se obține valoarea de referință a mărimii măsurate.

Eroarea tolerată de indicație $\Delta_{i\,ad}$ *este eroarea de indicație maximă a unui aparat de măsurat, admisă de prevederile unui standard de stat, ale unei instrucțiuni de verificare sau ale unei norme oficiale.*

Eroarea relativă a indicației aparatului Δ_α *este raportul dintre eroarea de indicație* Δ_i *și valoarea de referință* X_0 *a mărimii măsurate :*

$$\boxed{\Delta_\alpha = \frac{\Delta_i}{X_0} = \frac{x_i - X_0}{X_0}}$$

Eroarea raportată a indicației *aparatului este eroarea de indicație raportată la limita (valoarea) maximă de măsurare* X_m *a aparatului :*

$$\Delta_\alpha = \frac{\Delta_i}{X_m} = \frac{x_i - X_0}{X_m}$$

Eroarea raportată nu caracterizează gradul de precizie al măsurării, ci precizia aparatului de măsurat.

Atît eroarea relativă cît și eroarea raportată a indicației se exprimă de obicei în procente (prin înmulțirea expresiilor lui Δ_α cu 100).

● **Clasa de precizie.** *Clasa de precizie a unui aparat de măsurat reprezintă raportul dintre eroarea tolerată de indicație,* $\Delta_{i\,ad}$ *și limita maximă de măsurare* X_m *a aparatului, exprimat în procente ;*

$$C = \frac{\Delta_{i\,ad}}{X_m} 100 \quad [\%]$$

Clasa de precizie se exprimă printr-un număr C, denumit *indice de clasă,* care se găsește scris pe cadranul fiecărui aparat.

Clasa de precizie constituie o caracteristică a aparatelor de măsurat electrice, după care se face clasificarea lor din punctul de vedere al preciziei. Conform STAS 4640/1—71, clasele de precizie ale aparatelor de măsurat electrice sînt : 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2,5 ; 5.

Cunoscîndu-se clasa de precizie a aparatului de măsurat, se poate deduce eroarea tolerată de indicație $\Delta_{i\,ad}$ a acestuia, cu ajutorul următoarei relații (dedusă din expresia clasei de precizie) :

$$\Delta_{i\,ad} = \frac{C}{100} X_m$$

exprimată în unitățile scrise pe scara sa.

Exemplu. Pentru un ampermetru de clasă de precizie 0,5 și cu limita maximă de măsurare $X_m = 5$ A, eroarea tolerată de indicație este :

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

REZUMAT

● **Măsurări, mijloace și metode de măsurare**

— Măsurare = aprecierea cantitativă a mărimilor fizice, prin comparare cu altă mărime de același fel luată ca unitate de măsură.

— Valoarea mărimii = raportul dintre mărimea de măsurat și unitatea de măsură.

— Mijloace de măsurare = mijloacele tehnice cu care se determină cantitativ mărimea de măsurat :
  — măsuri ;
  — aparate de măsurat.

— Metode de măsurare = Modul de comparare a mărimilor de măsurat cu unitatea de măsurat.

● **Clasificarea metodelor de măsurare :**

— *După modul de obținere a valorii numerice a mărimii măsurate :*

— metode directe : — de citire ;
— de comparație : — metode de zero ;
— metode diferențiale ;
— metode de substituție ;

— metode indirecte.

— *După forma de indicare a valorii măsurate :*

— măsurări analogice ;
— măsurări numerice.

— *După precizia de măsurare :*

— metode de laborator ;
— metode industriale.

● **Aparate de măsurat electrice**

Principiul de funcționare :

— transformarea mărimii de măsurat într-o mărime perceptibilă prin intermediul unui semnal electric, utilizîndu-se fenomenele fizice legate de trecerea curentului electric sau de formarea cîmpului electromagnetic ;

— aparat de măsurat = traductor + dispozitiv de măsurat.

Clasificare :

— după metoda de măsurare : — aparate indicatoare ;
— aparate comparatoare ;

Eroarea raportată a indicației *aparatului este eroarea de indicație raportată la limita (valoarea) maximă de măsurare* X_m *a aparatului :*

$$\Delta_\alpha = \frac{\Delta_i}{X_m} = \frac{x_i - X_0}{X_m}$$

Eroarea raportată nu caracterizează gradul de precizie al măsurării, ci precizia aparatului de măsurat.

Atît eroarea relativă cît și eroarea raportată a indicației se exprimă de obicei în procente (prin înmulțirea expresiilor lui Δ_α cu 100).

● **Clasa de precizie.** *Clasa de precizie a unui aparat de măsurat reprezintă raportul dintre eroarea tolerată de indicație,* $\Delta_{i\,ad}$ *și limita maximă de măsurare* X_m *a aparatului, exprimat în procente ;*

$$C = \frac{\Delta_{i\,ad}}{X_m} 100 \quad [\%]$$

Clasa de precizie se exprimă printr-un număr C, denumit *indice de clasă,* care se găsește scris pe cadranul fiecărui aparat.

Clasa de precizie constituie o caracteristică a aparatelor de măsurat electrice, după care se face clasificarea lor din punctul de vedere al preciziei. Conform STAS 4640/1—71, clasele de precizie ale aparatelor de măsurat electrice sînt : 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2,5 ; 5.

Cunoscîndu-se clasa de precizie a aparatului de măsurat, se poate deduce eroarea tolerată de indicație $\Delta_{i\,ad}$ a acestuia, cu ajutorul următoarei relații (dedusă din expresia clasei de precizie) :

$$\Delta_{i\,ad} = \frac{C}{100} X_m$$

exprimată în unitățile scrise pe scara sa.

Exemplu. Pentru un ampermetru de clasă de precizie 0,5 și cu limita maximă de măsurare $X_m = 5$ A, eroarea tolerată de indicație este :

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

REZUMAT

● **Măsurări, mijloace și metode de măsurare**

— Măsurare = aprecierea cantitativă a mărimilor fizice, prin comparare cu altă mărime de același fel luată ca unitate de măsură.

— Valoarea mărimii = raportul dintre mărimea de măsurat și unitatea de măsură.

— Mijloace de măsurare = mijloacele tehnice cu care se determină cantitativ mărimea de măsurat :
  — măsuri ;
  — aparate de măsurat.

— Metode de măsurare = Modul de comparare a mărimilor de măsurat cu unitatea de măsurat.

● **Clasificarea metodelor de măsurare :**

— *După modul de obținere a valorii numerice a mărimii măsurate :*
  — metode directe : — de citire ;
    — de comparație : — metode de zero ;
      — metode diferențiale ;
      — metode de substituție ;
  — metode indirecte.

— *După forma de indicare a valorii măsurate :*
  — măsurări analogice ;
  — măsurări numerice.

— *După precizia de măsurare :*
  — metode de laborator ;
  — metode industriale.

● **Aparate de măsurat electrice**

Principiul de funcționare :

— transformarea mărimii de măsurat într-o mărime perceptibilă prin intermediul unui semnal electric, utilizîndu-se fenomenele fizice legate de trecerea curentului electric sau de formarea cîmpului electromagnetic ;

— aparat de măsurat = traductor + dispozitiv de măsurat.

Clasificare :

— după metoda de măsurare : — aparate indicatoare ;
  — aparate comparatoare ;

— după principiul de funcţionare : — aparate analogice ;
— aparate numerice.

Caracteristici metrologice :

— precizia, fidelitatea, justeţea, sensibilitatea, mobilitatea

- **Erorile de măsurare**

Erorile măsurărilor :

Eroare de măsurare = valoarea măsurată — valoarea adevărată (de referinţă).

Eroarea relativă = $\frac{\text{eroarea de măsurare}}{\text{valoarea de referinţă.}}$

Erorile aparatelor de măsurat :

Eroarea de indicaţie = indicaţia aparatului — valoarea adevărată (de referinţă).

Corecţie de indicaţie = — eroarea de indicaţie.

Eroarea relativă a indicaţiei = $\frac{\text{eroare de indicaţie}}{\text{valoarea de referinţă.}}$

Eroarea tolerată de indicaţie = eroarea de indicaţie maximă admisibilă.

Eroarea raportată a indicaţiei = $\frac{\text{eroarea de indicaţie}}{\text{limita maximă de măsurare a aparatului}}$

Clasa de precizare a aparatului = $\frac{\text{eroarea tolerată de indicaţie}}{\text{limita maximă de măsurare a aparatului}}$

INTREBĂRI DE CONTROL

1. Care sînt elementele componente ale procesului de măsurare ?
2. Care sînt mijloacele de măsurare şi care este diferenţa dintre ele ?
3. Care sînt metodele de măsurare de comparaţie şi prin ce se deosebesc ?
4. Care este deosebirea între măsurările analogice şi cele numerice ?
5. Care este principiul de funcţionare al aparatelor de măsurat electrice ? Care sînt elementele sale componente ?
6. Care sînt caracteristicile metrologice ale aparatelor de măsurat electrice ?
7. Care sînt erorile de măsurare ?
8. Care sînt cauzele erorilor de măsurare ?
9. Cum se defineşte clasa de precizie a unui aparat de măsurat ?

CAPITOLUL II

Aparate de măsurat analogice

A. Principiul de funcţionare

Funcţionarea aparatelor de măsurat analogice *se bazează pe transformarea energiei electrice sau magnetice a mărimii de măsurat (sau a semnalului electric intermediar) în energie mecanică, energie care produce mărimea perceptibilă sub forma unei deplasări unghiulare sau liniare a unui echipaj mobil.* Transformarea energiei are loc în conformitate cu fenomenul fizic care stă la baza construcţiei şi funcţionării dispozitivului de măsurat.

Dispozitivele de măsurat ale aparatelor analogice se compun, în general, dintr-o parte fixă şi o parte mobilă. Partea mobilă se deplasează sub acţiunea unui cuplu de forţe, denumit **cuplu activ** M_a, care apare ca urmare a interacţiunii dintre mărimile fizice (dintre care, de obicei, una este mărimea de măsurat sau semnalul electric intermediar) existente în cele două părţi.

Cuplul activ depinde de valoarea energiei cîmpului magnetic sau electric produs de semnalul electric primit, deci de mărimea de măsurat X şi de principiul de funcţionare al dispozitivului de măsurat. Fiecărei valori a mărimii de măsurat îi corespunde pentru aparatul dat o valoare complet determinată a cuplului activ, adică :

$$M_a = f(X).$$

Dacă asupra echipajului mobil al dispozitivului de măsurat ar acţiona 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, proporţional cu unghiul de rotaţie α a echipajului mobil, denumit **cuplu rezistent** M_r :

$$M_r = D\alpha$$

unde D este o constantă constructivă, denumită *cuplu rezistent specific.*

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

Aşadar echipajul mobil se roteşte sub acţiunea simultană a cuplului activ şi a cuplului rezistent pînă cînd acesta din urmă, crescînd cu unghiul de rotire, egalează cuplul activ. Unghiul de rotire pentru care se obţine echilibrul se numeşte *deviaţie permanentă*. Poziţia de echilibru se caracterizează deci prin aceea că suma cuplurilor care acţionează asupra echipajului mobil este nulă. Dacă se neglijează într-o primă aproximaţie cuplul de frecări, această condiţie se scrie :

$$M_a - M_r = 0.$$

Înlocuindu-se în această relaţie cele două cupluri cu expresiile lor se obţine :

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

de unde :

$$\boxed{\alpha = \frac{1}{D} f(X) = f_1(X)}$$

Această funcţie exprimă dependenţa deviaţiei α a echipajului mobil de mărimea de măsurat X şi reprezintă *caracteristica de transfer statică a aparatelor de măsurat analogice*. În acelaşi timp poate fi considerată şi ca o *caracteristică a scării*, deoarece determină aşezarea relativă a reperelor pe scară.

La aparatele la care echipajul mobil se reazemă pe lagăre apar frecări care dau naştere unui **cuplu de frecare**, orientat în sens opus rotirii. Ca efect al acestui cuplu, echipajul mobil se stabileşte la poziţia de echilibru ceva mai înainte decît în cazul lipsei frecării. Valoarea cuplului de frecări, stabilită experimental, este determinată de greutatea echipajului mobil şi de materialul şi starea suprafeţei lagărelor şi pivoţilor.

B. Clasificarea aparatelor de măsurat analogice

Aparatele de măsurat analogice sînt de o mare diversitate constructivă determinată în primul rînd de natura fenomenului fizic care stă la baza funcţionării lor. Astfel, se deosebesc următoarele grupe principale de aparate analogice, clasificate după principiul lor de funcţionare :

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

— *aparate feromagnetice* (cu fier mobil), care conţin o piesă mobilă din fier supusă acţiunii cîmpului unei bobine fixe parcursă de curent sau a cîmpului unei piese fixe din fier magnetizat de curent :

— *aparate electrodinamice*, care folosesc acţiunea forţelor electrodinamice care se exercită între bobinele fixe şi mobile parcurse de curenţi ;

— *aparate ferodinamice*, care funcţional sînt asemănătoare cu cele electrodinamice, acţiunile electrodinamice fiind sporite prin folosirea de piese feromagnetice aşezate în calea liniilor de cîmp magnetice ;

—*aparate de inducţie*, care folosesc interacţiunea dintre cîmpurile magnetice produse de una sau mai multe bobine fixe parcurse de curenţi alternativi şi curenţii induşi de aceştia în piese conductoare mobile ;

— *aparate electrostatice*, care funcţionează sub acţiunea forţelor electrostatice care se exercită între piese metalice fixe şi mobile între care există o diferenţă de potenţial electric ;

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

— *aparate bimetalice*, în care se foloseşte deformarea unei lame din bimetal datorită încălzirii sale directe sau indirecte de către curentul de măsurat ;

— *aparate cu termocuplu*, în care se măsoară cu ajutorul unui aparat magnetoelectric tensiunea 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 cărora se măsoară curenţi sau tensiuni alternative ;

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

Principiul de funcţionare a dispozitivului de măsurat este indicat pe cadranul fiecărui aparat de măsurat electric, prin diferite simboluri (arătate în tabela 2.1). În afară de aceasta, pe cadran se mai inscripţionează unitatea de măsură, natura curentului, clasa de precizie, poziţia normală de funcţionare, tensiunea de încercare dielectrică, valorile nominale, marca fabricii constructoare etc.

Tabela 2—1

Simbolurile aparatelor de măsurat electrice

I. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE	
Felul aparatului	Simbol
Magnetoelectric (cu cadru mobil)	
Magnetoelectric (cu magnet mobil)	
Logometru magnetoelectric	
Feromagnetic	
Logometru feromagnetic	
Electrodinamic	
Logometru electrodinamic	
Ferodinamic	
Logometru ferodinamic	
De inducție	
Electrostatic	
Termic cu fir cald	
Bimetalic	
Magnetoelectric cu termocuplu	
Magnetoelectric cu redresor	
Cu lame vibrante	

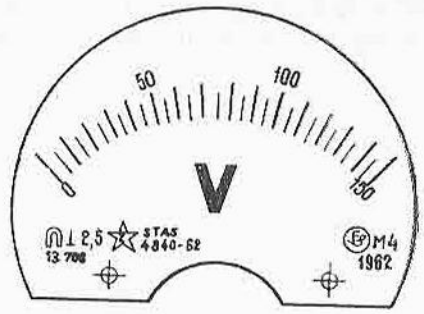
II. NATURA CURENTULUI	
Felul curentului	Simbol
Curent continuu	—
Curent alternativ	~
Curent continuu și alternativ monofazat	≃

III. CLASA DE PRECIZIE	
Erorile (exprimate în procente) la care se referă clasa	Simbol
Valoarea maximă a domeniului de măsurare	0,5
Lungimea scării gradate	0,5
Valoare exactă	(0,5)

IV. POZIȚIA NORMALĂ DE FUNCȚIONARE	
Poziția cadranului	Simbol
Verticală	⊥
Orizontală	⌐
Înclinată față de orizontală (ex. 60°)	∠60°

V. TENSIUNEA DE ÎNCERCARE DIELECTRICĂ	
Valoarea tensiunii	Simbol
500 V	☆
Peste 500 V (de ex. 2 kV)	☆2
Fără încercare dielectrică	☆0

Fig. 2.1. **Inscripție de pe cadranul unui voltmetru magnetoelectric.**



În figura 2.1 este reprezentat cadranul cu inscripții și simboluri ale unui voltmetru magnetoelectric fabricat de „Întreprinderea de aparate electrice de măsurat" — Timișoara.

C. Părțile componente ale aparatelor de măsurat analogice

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

Aparatele analogice, ca orice aparat electric de măsurat, se compun din dispozitivul de măsurat, traductorul și diferite accesorii.

1. Dispozitivul de măsurat

Dispozitivul de măsurat *este format din ansamblul organelor din a căror interacțiune apar forțe mecanice care determină mișcarea unui echipaj mobil, ale cărui deplasări, liniare sau unghiulare, reprezintă valoarea mărimii măsurate.*

Constructiv, dispozitivul de măsurat diferă de la un tip de aparat la altul după principiul de funcționare. În general, el se compune dintr-o parte fixă și una mobilă, alcătuite fiecare din elemente active și elemente auxiliare.

● **Elementele active** sînt cele care în prezența mărimii electrice de măsurat interacționează producînd deplasarea părții mobile. Se deosebesc ca elemente active: *echipajul fix și echipajul mobil.*

Echipajul fix al dispozitivului de măsurat. *Echipajul fix produce cîmpul magnetic sau electric ce provoacă mișcarea sistemului mobil.* El poate fi alcătuit 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).

Echipajul mobil al dispozitivului de măsurat. *Echipajul mobil produce un cîmp de aceeași natură cu cel produs de echipajul fix, cu care interacționează și dă naștere forțelor sau cuplului mecanic.* Echipajul 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).

Echipajul 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.

Elementele auxiliare concură alături de cele active la obținerea unei deplasări a părții mobile proporțională cu mărimea de măsurat, la indicarea valorii acesteia, la reglarea și funcționarea optimă a dispozitivului de măsurat, precum și la fixarea și consolidarea diverselor elemente componente. Principalele elemente auxiliare sînt: *dispozitivul de producere a cuplului rezistent, corectorul de zero, dispozitivul de citire* și *amortizorul.*

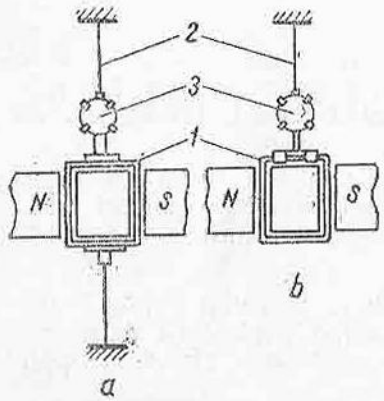


Fig. 2.2. **Suspensia sistemului mobil pe benzi tensionate și pe fir de torsiune:**
1 — cadrul mobil; *2* — banda tensionată sau firul de torsiune; *3* — oglindă.

Dispozitivul de producere a cuplului rezistent. *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 arcuri spirale (fig. 2.3), iar la aparatele cu echipajul mobil suspendat pe benzi sau fire de torsiune chiar de benzile sau firele de suspensie, prin răsucirea sau dezrăsucirea lor odată cu rotirea echipajului mobil.

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

$$M_r = D\alpha$$

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

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

Arcurile spirale sînt fixate cu un capăt de axul echipajului mobil, iar cu celălalt capăt de șasiul dispozitivului de măsurat sau de o piesă mobilă, numită *corector de zero.*

Cuplul rezistent electric este produs în același mod ca și cuplul activ de forțe electromagnetice. Dispozitivele de măsurat cu cuplu rezistent electric au echipajul mobil 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 cuplu activ, iar celălalt cuplu rezistent.

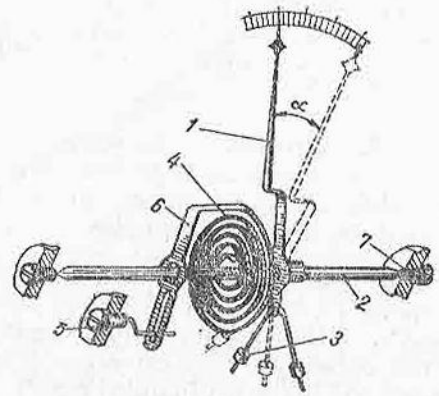


Fig. 2.3. **Dispozitivul de producere a cuplului rezistent, corectorul și dispozitivul de citire al unui aparat indicator:**
1 — acul indicator; *2* — axul echipajului mobil; *3* — contragreutățile; *4* — arcul spiral; *5* — corectorul; *6* — antrenorul corectorului; *7* — lagărul.

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.

Corectorul de zero servește la reglarea poziției de zero a dispozitivului de citire al aparatului. Corectorul (fig. 2.3) constă dintr-un șurub prevăzut cu o tijă excentrică față de axa sa de rotație, care poate deplasa prin intermediul unui antrenor punctul de fixare a unuia dintre arcurile spirale.

Dispozitivul de citire. *Dispozitivul de citire este ansamblul elementelor care indică valoarea mărimii măsurate.* El este alcătuit dintr-un *indicator,* solidar cu echipajul mobil, care se mișcă în fața unei *scări gradate,* trasată pe un *cadran.*

Scara gradată reprezintă totalitatea reperelor și cifrelor 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.

Cadranul este suprafața (de obicei metalică) pe care este trasată scara gradată și sînt înscrise simbolurile și caracteristicile dispozitivului de măsurat. Forma cadranelor este diferită în funcție de forma aparatului și unghiul maxim de deviație a echipajului mobil (între 90 și 240°).

Indicatorul arată deplasarea echipajului mobil. El este, în general, un *ac rigid de aluminiu,* cu vîrful în formă de săgeată sau cuțit, fixat pe axul echipajului mobil și echilibrat cu două contragreutăți plasate în partea opusă (fig. 2.3). La aparatele de mare sensibilitate se folosesc *indicatoare cu spot luminos.* Acestea constau dintr-o mică oglindă fixată pe echipajul mobil, care reflectă o rază de lumină primită de la o sursă aflată în interiorul sau în afara aparatului, trimițînd-o, sub forma unui spot luminos, pe o riglă gradată exterioară (fig. 2.4, *a*) sau pe un cadran interior (fig. 2.4, *b*).

Amortizorul. *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,* închis la capete, în interiorul căruia se mișcă o paletă *2* (fig. 2.5, *a*) sau un piston *2* (fig. 2.5, *b*), solidar legate cu axul *3* al echipajului mobil. Prin rezistența pe care aerul o opune mișcării paletei se amortizează oscilațiile echipajului mobil.

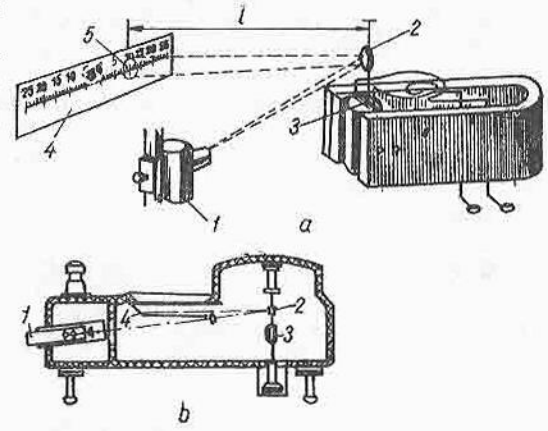


Fig. 2.4. **Indicator cu spot luminos :**
1 — sursa de lumină ; *2* — oglinda ; *3* — sistemul mobil ; *4* — rigla (cadranul) gradată ; *5* — spotul luminos cu reticul.

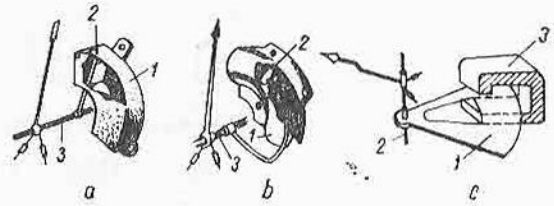


Fig. 2.5. **Amortizoare.**

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 echipajului mobil, care se mișcă între polii unui magnet permanent *3.* Datorită interacțiunii dintre curenții turbionari ce iau naștere în disc, la mișcarea acestuia în cîmpul magnetului permanent și fluxul magnetic al acestuia, se produce un cuplu care se opune mișcării discului. Se obține astfel frînarea discului și amortizarea rapidă a oscilațiilor echipajului mobil.

2. Traductorul

Traductorul *este format din ansamblul elementelor care transformă mărimea de măsurat într-un semnal electric, care de obicei este curent sau tensiune electrică.*

Traductorul transformă în curent sau tensiune atît mărimi electrice (rezistență, inductanță, capacitate, putere, energie, frecvență etc.) cît și mărimi magnetice (flux, cîmp, 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 piezoelectrice etc. Dintre acestea, cele mai des întîlnite sînt șunturile și rezistențele adiționale.

● **Șuntul.** *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 :

$$R_s = \frac{R_a}{n-1}$$

în care $n = \frac{I}{I_a}$ este *coeficientul de șuntare*, 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 legate în serie (prevăzute cu cîte 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

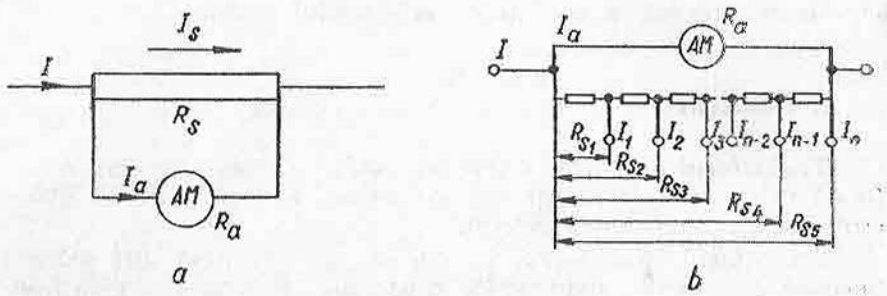


Fig. 2.6. **Schema șunturilor.**

dispozitivului de măsurat și a doua (cea exterioară) pentru legarea în circuitul de măsurare.

Șunturile pot fi montate în interiorul aparatelor (pentru curenți de la cîteva zeci de miliamperi pînă la cîteva 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 trebuie să nu se încălzească.

● **Rezistența adițională.** *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 :

$$R_{ad} = R_a(n-1)$$

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 manganină izolată, înfășurată pe plăci de prespan, ardezie sau role de porțelan.

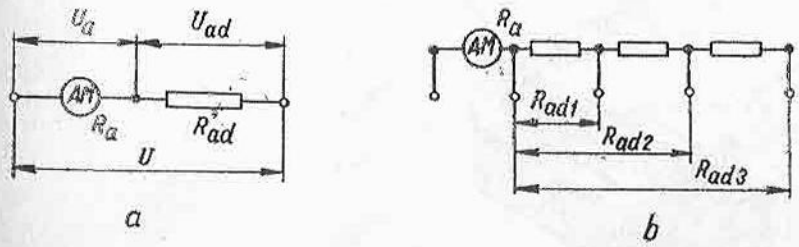


Fig. 2.7. **Schema rezistențelor adiționale :**
a — cu o singură limită de măsurare ; *b* — cu mai multe limite de măsurare.

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 piezoelectrice etc. Dintre acestea, cele mai des întîlnite sînt șunturile și rezistențele adiționale.

● **Șuntul.** *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 :

$$R_s = \frac{R_a}{n-1}$$

în care $n = \frac{I}{I_a}$ este *coeficientul de șuntare*, 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 legate în serie (prevăzute cu cîte 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

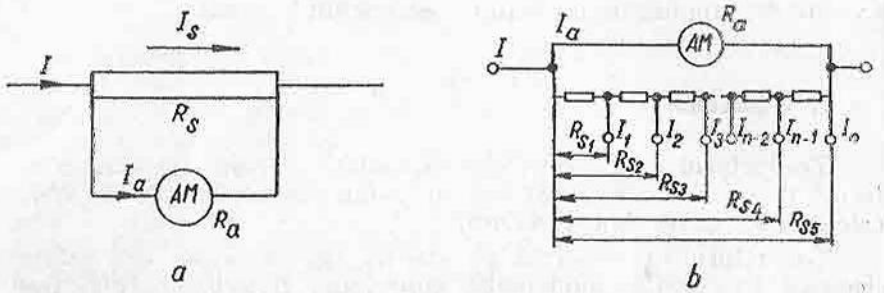


Fig. 2.6. **Schema șunturilor.**

dispozitivului de măsurat și a doua (cea exterioară) pentru legarea în circuitul de măsurare.

Șunturile pot fi montate în interiorul aparatelor (pentru curenți de la cîteva zeci de miliamperi pînă la cîteva 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 trebuie să nu se încălzească.

● **Rezistența adițională.** *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 :

$$R_{ad} = R_a(n-1)$$

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 manganină izolată, înfășurată pe plăci de prespan, ardezie sau role de porțelan.

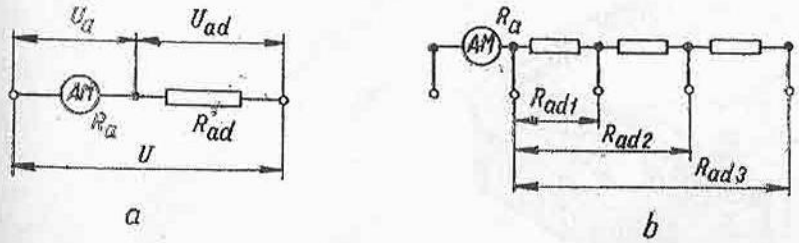


Fig. 2.7. **Schema rezistențelor adiționale :**
a — cu o singură limită de măsurare ; *b* — cu mai multe limite de măsurare.

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.).

D. Dispozitive de măsurat analogice

1. Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice

● **Funcționare și construcție.** *În dispozitivele de măsurat magnetoelectrice pentru deplasarea echipajului mobil se folosește energia cîmpului 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 ;
— cu bobină fixă și magnet mobil.

Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice cu magnet fix și bobină mobilă sînt cele mai răspîndite. Aceste dispozitive (fig. 2.8) constau dintr-un circuit magnetic alcătuit dintr-un *magnet permanent 1*, în formă de potcoavă, la capetele căruia sînt fixate două *piese polare* cu deschidere cilindrică *2*, care cuprind între ele un *miez cilindric fix 3* și o *bobină mobilă 4*, ce se poate roti liber în jurul miezului cilindric în cîmpul magnetic radial și uniform din întrefierul circuitului magnetic. Bobina mobilă, constituită din înfășurarea unui conductor subțire (cu diametrul de 0,02—0,2 mm) de cupru sau aluminiu izolat pe un cadru ușor de aluminiu, este montată pe două *semiaxe* ale căror capete se reazemă în lagăre. De semiaxe sînt prinse două *arcuri spirale 5* care creează cuplul rezistent și în același timp servesc la aducerea curentului în bobina mobilă. Capătul fix al unuia dintre arcuri este prins la șasiul aparatului, iar al celuilalt la furca *corectorului de zero 6*. Pe unul dintre semiaxe este fixat *acul indicator 7*, al cărui capăt se deplasează în fața *scării gradate 8*. Acul este echilibrat de *contragreutățile 9*.

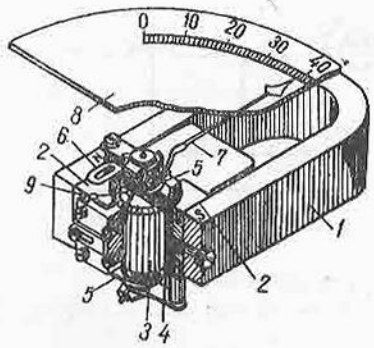


Fig. 2.8. **Dispozitivul de măsurat magnetoelectric.**

La trecerea unui curent continuu I prin bobină, ca urmare a interacțiunii curentului cu cîmpul magnetic al magnetului permanent, asupra părților active ale spirelor bobinei aflate în întrefier acționează forțele F, care dau naștere unui cuplu activ M_a care rotește bobina (fig. 2.9.), tinzînd să o așeze perpendicular pe liniile de forță ale cîmpului.

Acest cuplu este proporțional cu inducția magnetică B în întrefier, cu suprafața activă a bobinei $S = bl$ (unde b este lățimea și l — lungimea părții active a spirelor bobinei), cu numărul n de spire al bobinei și curentul I care trece prin bobină :

$$M_a = 2F\frac{b}{2} = BlnIb = BSnI$$

Bobina mobilă se rotește pînă cînd cuplul rezistent dat de arcurile spirale ($M_r = D\alpha$), crescînd cu unghiul de rotire, egalează cuplul activ ($M_r = M_a$). Din egalitatea expresiilor celor două cupluri rezultă *ecuația caracteristică a scării*, care dă valoarea unghiului de deviație :

$$\boxed{\alpha = \frac{BSn}{D} I = S_I I}$$

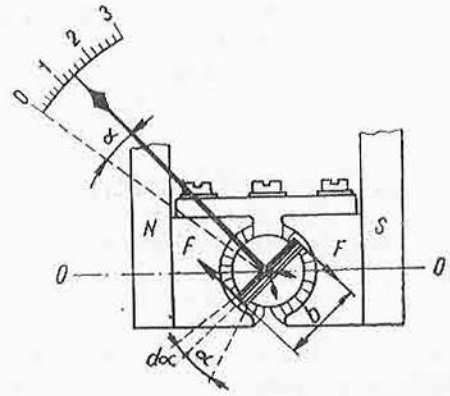


Fig. 2.9. **Schema dispozitivului de măsurat magnetoelectric.**

Raportul $S_I = \frac{BSn}{D}$ este compus numai din mărimi constructive constante și reprezintă *sensibilitatea dispozitivului față de curent*, adică deviația echipajului mobil pentru un curent egal cu unitatea.

Caracteristici. Caracteristica scării arată că la dispozitivele de măsurat magnetoelectrice deviația echipajului 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, echipajul mobil nu poate urmări variațiile acestuia din cauza momentului său de inerție relativ mare; 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 de 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 analogice indicatoare, putînd ajunge la clasa de precizie 0,1. Ele au, de asemenea, calitatea de a avea un *consum propriu redus* (cîțiva mW). Dispozitivele magnetoelectrice au însă dezavantajul că *nu funcționează decît în curent continuu* și *nu suportă supraîncărcări 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.

2. Dispozitivele de măsurat feromagnetice

Funcționare și construcție. *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. Echipajul mobil tinde să se așeze astfel încît să întărească cîmpul magnetic al bobinei.*

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

— *de atracție*, la care echipajul mobil este atras în cîmpul magnetic al bobinei;

— *de repulsie*, la care echipajul 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.

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.

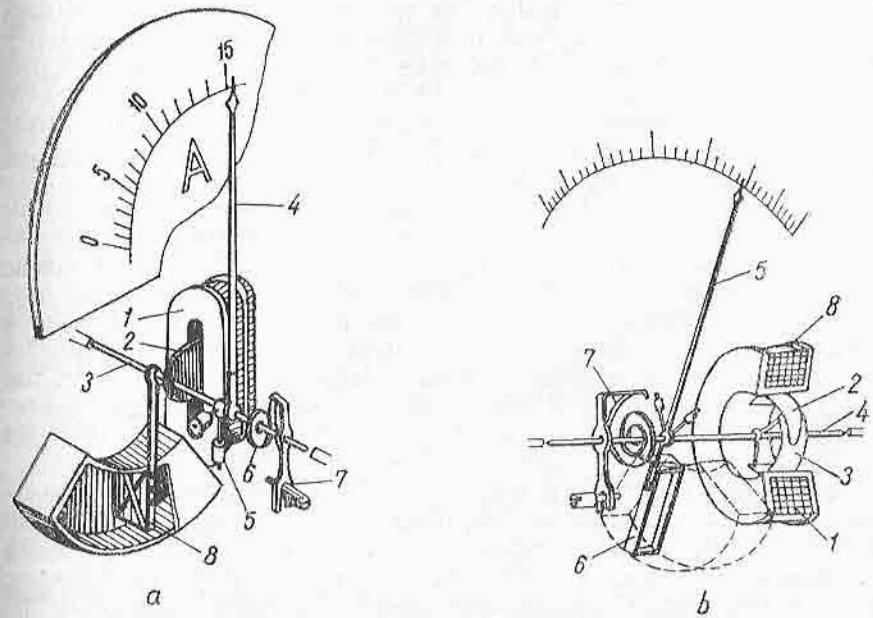


Fig. 2.10. **Dispozitivul de măsurat feromagnetic.**

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.

Cuplul activ al dispozitivelor de măsurat feromagnetice este proporțional cu pătratul curentului I care trece prin bobină

$$M_a = k I^2.$$

Acest cuplu este echilibrat de *cuplul rezistent* dat de arcurile spirale ($M_r = D\alpha$) astfel că rezultă *ecuația caracteristică a scării:*

$$\alpha = \frac{k}{D} I^2 = K I^2$$

● **Caracteristici.** Caracteristica scării arată că *scara gradată a dispozitivelor de măsurat feromagnetice este pătratică.* Se poate obține o uniformizare a scării începîndu-se de la 15—20% din valoarea limită superioară a mărimii de măsurat, prin modificarea formei pieselor feromagnetice și a poziției lor inițiale față de bobină.

În curent alternativ, odată cu schimbarea sensului curentului schimbîndu-se atît direcția fluxului magnetic cît și polaritatea pieselor feromagnetice, cuplul activ acționează tot timpul în același sens. Echipajul mobil avînd o inerție mare deviază sub acțiunea valorii medii a cuplului activ în cursul unei perioade și, prin urmare, deviația echipajului mobil este proporțională cu pătratul valorii eficace a mărimii de măsurat. Rezultă deci că *dispozitivele de măsurat feromagnetice pot fi întrebuințate atît în curent continuu cît și în curent alternativ*, deviația 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 sensuri contrare. Bobinele au miezuri separate, identice și fixate pe un ax comun. Cîmpul 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 rezultant al aparatului rămîne același.

Avantajele 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.*

Dezavantajele acestor dispozitive sînt: *scara gradată neuniform, consum propriu mare* (0,5—7,5 VA), *sensibilitatea redusă și dependența indicațiilor de cîmpurile magnetice exterioare.*

3. Dispozitivele de măsurat electrodinamice și ferodinamice

● **Funcționare și construcție.** *În dispozitele de măsurat electrodinamice și ferodinamice 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 (fig. 2.11) sînt constituite dintr-o *bobină* fixă cilindrică *1*, compusă din două jumătăți identice (legate în serie sau în paralel) și o *bobină mobilă 2*, care se mișcă în interiorul bobinei fixe în cîmpul produs de aceasta. Bobina mobilă este fixată rigid pe *axul 3* al echipajului mobil, de care se mai găsesc prinse *acul indicator 4, contragreutățile 5* și *paleta 6* a *amortizorului 7*. Curentul este adus la bobina mobilă prin două *arcuri spirale 8*, care servesc totodată la crearea cuplului rezistent.

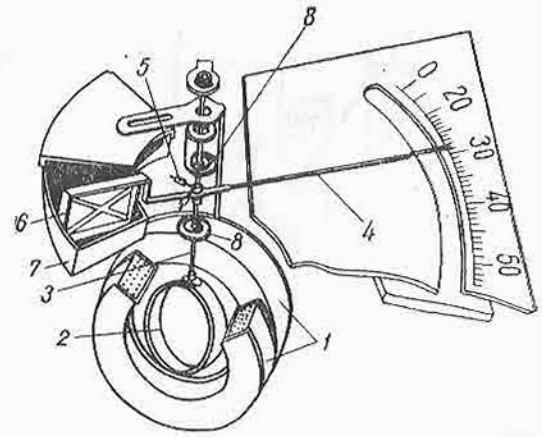


Fig. 2.11. **Dispozitivul de măsurat electrodinamic.**

Dispozitivele de măsurat ferodinamice (fig. 2.12) 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 cîmp magnetic puternic și ca urmare a unui cuplu activ mult mai mare. Construcția dispozitivelor de măsurat ferodinamice este asemănătoare în mare măsură dispozitivelor magnetoelectrice, în care magnetul permanent este înlocuit printr-un electromagnet. În întrefierul acestor aparate, de asemenea, se creează un cîmp 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 prin aceasta să treacă o parte cît mai mare a fluxului bobinei fixe, adică fluxurile celor două bobine să coincidă.

La funcționarea în curent continuu cuplul activ este proporțional cu produsul curenților I_1 și I_2 prin cele două bobine :

$$M_a = k\, I_1\, I_2.$$

Cuplul activ rotește bobina pînă cînd este echilibrat de cuplul rezistent ($M_r = D\,\alpha$) dat de arcurile spirale. Din relația de echilibru $M_a = M_r$ rezultă *ecuația caracteristică a scării :*

$$\boxed{\alpha = \frac{k}{D} I_1 I_2 = K I_1 I_2}$$

Această relație arată că *în curent continuu deviația echipajului mobil este proporțională cu produsul curenților prin cele două bobine.*

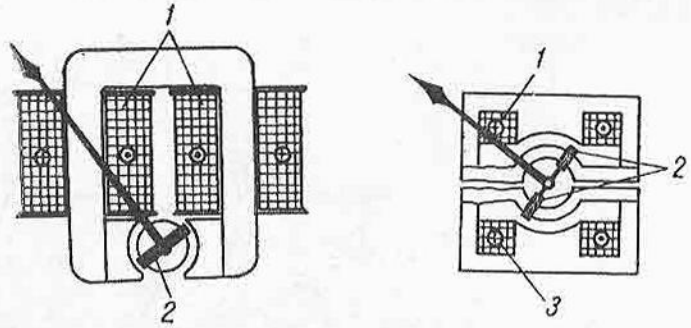


Fig. 2.12. **Dispozitivul de măsurat ferodinamic :**
1 — bobina fixă ; *2* — bobina mobilă ; *3* — circuitul magnetic.

Dacă bobinele se înseriază, curentul prin ele va fi același ($I_1 = I_2 = I$) și ca urmare deviația este proporțională cu pătratul acestui curent ($\alpha = KI^2$), deci scara aparatului este pătratică. Prin alegerea dimensiunilor bobinelor și a poziției lor reciproce, se poate obține uniformizarea scării pe aproape toată lungimea ei.

La funcționarea în curent alternativ, la schimbarea concomitentă a sensului curenților I_1 și I_2 sensul cuplului activ nu se schimbă, astfel că dispozitivele de măsurat electrodinamice și ferodinamice pot funcționa și în curent alternativ. La trecerea curentului alternativ, datorită inerției sale, echipajul mobil nu poate urmări variațiile cuplului activ instantaneu, deviația lui fiind determinată de valoarea medie a cuplului activ $M_{a\,med}$ într-o perioadă, care pentru curenți sinusoidali are expresia :

$$M_{a\,med} = k\, I_1\, I_2 \cos\,(\widehat{I_1\, I_2}).$$

Din relația de echilibru $M_a = M_r$ rezultă *ecuația caracteristică a scării :*

$$\boxed{\alpha = \frac{k}{D} I_1 I_2 \cos\,(\widehat{I_1 I_2}) = K\, I_1\, I_2 \cos\,(\widehat{I_1 I_2})}$$

care arată că *în curent alternativ deviația echipajului mobil este proporțională cu produsul valorilor eficace I_1 și I_2 ale curenților prin bobine și cosinusul unghiului de defazaj dintre curenți.*

● **Caracteristici.** *Dispozitivele de măsurat electrodinamice și ferodinamice pot fi utilizate atît în curent continuu cît și în curent alternativ.*

Indicațiile dispozitivelor de măsurat electrodinamice și ferodinamice sînt influențate de cîmpurile magnetice exterioare (numai la dispozitivele electrodinamice), *de variația frecvenței curentului și a temperaturii mediului înconjurător* (datorită variației rezistenței înfășurării bobinelor și schimbării elasticității arcurilor spirale).

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

Avantajele 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 şi menţinerii cîmpului magnetic interior), *rezistenţă mecanică scăzută la suprasarcini, preţ de cost ridicat şi scară neuniformă.*

4. Dispozitivele de măsurat de inducţie

● **Funcţionare şi construcţie.** *Funcţionarea dispozitivelor de măsurat de inducţie se bazează pe interacţiunea dintre unul sau mai multe fluxuri magnetice alternative şi curenţii induşi de aceste fluxuri în echipajul mobil* (de obicei un disc de aluminiu). Ca urmare, dispozitivele de măsurat de inducţie nu pot funcţiona decît în curent alternativ.

După numărul fluxurilor magnetice care produc cuplul activ, dispozitivele de inducţie se împart în două tipuri:

— *dispozitive de măsurat de inducţie cu flux unic,* în care cuplul activ este produs de un singur flux. Constructiv, aceste dispozitive constau dintr-un electromagnet în întrefierul căruia se roteşte un disc de aluminiu aşezat asimetric faţă de polul electromagnetului. Aceste dispozitive deşi sînt simple au utilizare redusă, din cauza cuplului activ mic;

— *dispozitive de măsurat de inducţie cu fluxuri multiple,* în care la crearea cuplului activ participă mai multe fluxuri. Fluxurile sînt defazate în timp şi decalate în spaţiu putînd produce în întrefierul electromagneţilor un cîmp magnetic rezultant învîrtitor sau de fugă (care se deplasează de la un pol la altul, de la fluxul în avans spre cel în întîrziere). În prezent, în construcţia de aparate de măsurat de inducţie se folosesc numai dispozitive cu cîmp de fugă, datorită simplităţii şi robusteţei lor.

Dispozitivul de inducţie cu trei fluxuri cu cîmp magnetic de fugă este cel mai răspîndit în practică. Acesta constă din doi electromagneţi cu fluxuri independente, dintre care unul străbate discul de două ori, astfel încît discul este străbătut de trei fluxuri. Aceste dispozitive pot fi *tangenţiale* (fig. 2.13, *a*) cînd electromagneţii sînt dispuşi într-un singur plan perpendicular pe raza discului, sau *radiale* (fig. 2.13, b) cînd un electromagnet este orientat pe direcţia razei discului iar celălalt tangenţial, perpendicular pe primul.

În figura 2.14, *a* este reprezentată schema unui dispozitiv de inducţie cu trei fluxuri de tip tangenţial. Prin bobinele electromagneţilor *1* şi *2* trec curenţii I_1 şi I_2, defazaţi cu un unghi Ψ, Curenţii din bobine produc fluxurile magnetice Φ'_U şi Φ_I, care în cazul miezurilor nesaturate sînt sinusoidale, proporţionale şi în fază cu curenţii I_1, respectiv I_2.

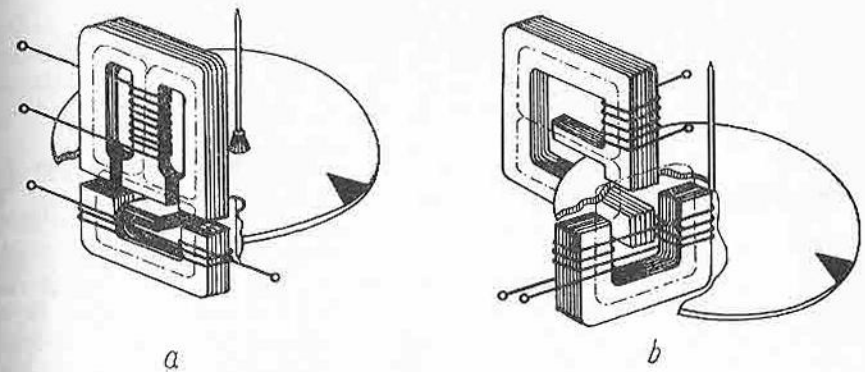


Fig. 2.13. **Dispozitivul de măsurat de inducţie cu trei fluxuri.**

Fluxul Φ_I se închide pe calea reluctanţei minime prin partea de jos a electromagnetului *2*, traversînd discul *3* în două locuri (în dreptul polilor *a* şi *c*) în sensuri opuse şi prezentîndu-se astfel faţă de disc ca două fluxuri Φ_I şi $-\Phi_I$ decalate în spaţiu şi defazate în timp cu π. Fluxul produs de curentul I_1 se împarte în două părţi: fluxul util Φ_U care traversează discul şi se închide prin contrapolul *4* şi fluxul inactiv Φ'_U care se închide prin miezurile

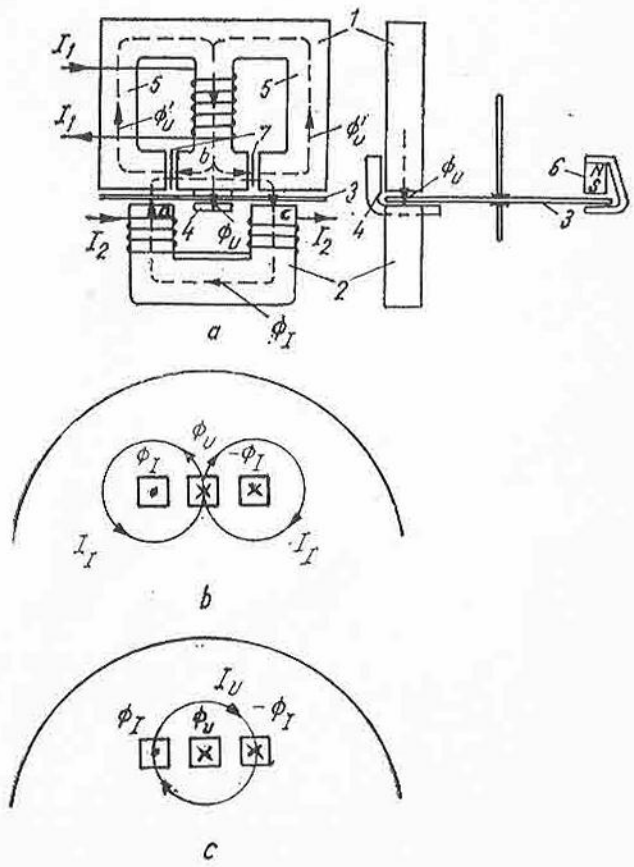


Fig. 2.14. **Dispozitive de măsurat de inducţie cu trei fluxuri cu cîmp de fugă.**

laterale 5. Prin urmare, discul este străbătut de trei fluxuri Φ_I, $-\Phi_I$ și Φ_U, decalate în spațiu și defazate în timp. Aceste fluxuri formează în întrefierul electromagneților un cîmp magnetic rezultant de fugă, care se deplasează de la un pol la altul, de la fluxul în avans spre cel în întîrziere.

Fluxurile străbătînd discul induc în acesta tensiuni electromotoare, care sînt defazate în urma lor cu un unghi $\frac{\pi}{2}$. Tensiunile electromotoare la rîndul lor dau naștere în disc la curenții I_I, $-I_I$ și I_U, în fază cu ele (deoarece inductanța discului este neînsemnată în comparație cu rezistența sa) și avînd sensurile din figura 2.14, *b* și *c*. Curenții induși găsindu-se în cîmpul magnetic al electromagneților interacționează cu fluxurile magnetice care străbat discul dînd naștere unor forțe care în cazul discului se manifestă sub forma unor cupluri. Astfel apar cupluri datorită interacțiunii dintre fluxurile Φ_I și $-\Phi_I$ și curentul I_U (fig. 2.14, *c*) și dintre fluxul Φ_U și curenții I_I și $-I_I$ (fig. 2.14, *b*). Cuplurile datorite interacțiunii dintre fluxuri și curenții induși de ei înșiși sînt neînsemnate deoarece discul avînd o inductanță neglijabilă, defazajul dintre fluxuri și curenții induși este aproape egal cu $\frac{\pi}{2}$. Discul se rotește sub acțiunea unui cuplu rezultant sumă a acestor cupluri care pentru o frecvență constantă are expresia :

$$M_a = k\,\Phi_I\,\Phi_U\,\sin\,(\widehat{\Phi_I\,\Phi_U}) = k'\,I_1\,I_2\,\sin\,(\widehat{I_1\,I_2})$$

dacă se consideră fluxurile proporționale și în fază cu curenții de magnetizare I_U și I_2.

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

Dispozitivele de măsurat de inducție pot funcționa ca aparat indicator sau, cel mai adesea, ca aparat integrator.

În cazul funcționării ca aparat indicator, dispozitivul de măsurat este prevăzut cu arcuri spirale, care produc un cuplu rezistent $M_r = D\alpha$. Din condiția de echilibru $M_a = M_r$ se deduce *ecuația caracteristică a scării :*

$$\alpha = \frac{k'}{D}\,I_1\,I_2\,\sin\,(\widehat{I_1\,I_2}) = K\,I_1\,I_2\,\sin\,(\widehat{I_1\,I_2})$$

care arată că *deviația echipajului mobil este proporțională cu produsul valorilor eficace I_1 și I_2 ale curenților prin bobine și sinusul unghiului de defazaj dintre curenți.*

În cazul funcționării ca aparat integrator discul se rotește continuu, cuplul rezistent fiind înlocuit cu un cuplu de frînare dat de acțiunea unui magnet permanent *6* asupra curenților induși de el în discul de aluminiu.

● **Caracteristici.** *Indicațiile dispozitivelor de măsurat de inducție sînt influențate de variația temperaturii mediului înconjurător,* care modifică rezistența discului și deci curenții induși, *și de variația frecvenței,* care modifică curenții induși prin modificarea reactanței înfășurărilor electromagneților, ceea ce provoacă schimbarea defazajului curenților și fluxurilor magnetice (mai ales pentru valori mari ale factorului de putere).

Avantajele dispozitivelor de măsurat de inducție sînt *cuplu activ puternic* (avînd un cîmp magnetic intens), *rezistență la suprâncărcări, funcționare sigură* și *consum propriu redus.*

Dezavantajele acestor dispozitive constau în *dependența indicațiilor de frecvența și forma curentului și de temperatura ambiantă, scara gradată neuniformă* și *clasa de precizie redusă* (1,5—2).

5. Dispozitivele de măsurat electrostatice

● **Funcționare și construcție.** *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.*

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. 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.

Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variația suprafeței active a armăturilor (fig. 2.15) 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.

Aplicîndu-se tensiunea de măsurat între armăturile fixe și cele mobile, acestea se încarcă cu electricitate de semn contrar. Între armături ia naștere un cîmp electric, sub a cărui acțiune armăturile mobile se rotesc în spațiul dintre armăturile fixe, tinzînd să ocupe o poziție pentru care energia înmagazinată în cîmpul electric are valoarea maximă.

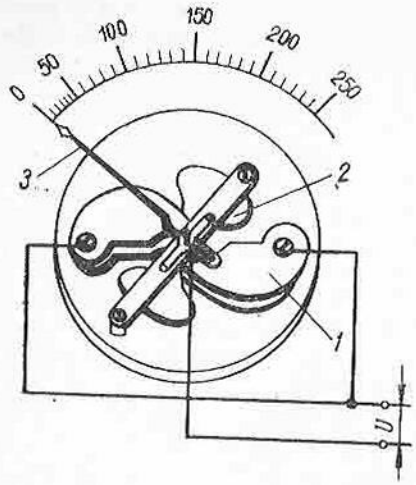


Fig. 2.15. **Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variaţia suprafeţei active a armăturilor.**

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

Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variaţia distanţei dintre armături (fig. 2.16) este alcătuit din *două plăci fixe 1* şi *2*, între care se află o *placă mobilă 3*, suspendată cu *două benzi subţiri de bronz 4*. Placa mobilă este legată electric cu una dintre plăcile *fixe 1* şi este izolată de cealaltă. Aplicîndu-se tensiunea de măsurat la bornele aparatului, placa mobilă şi placa fixă *1* se încarcă cu electricitate de acelaşi 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 şi *axul 7*.

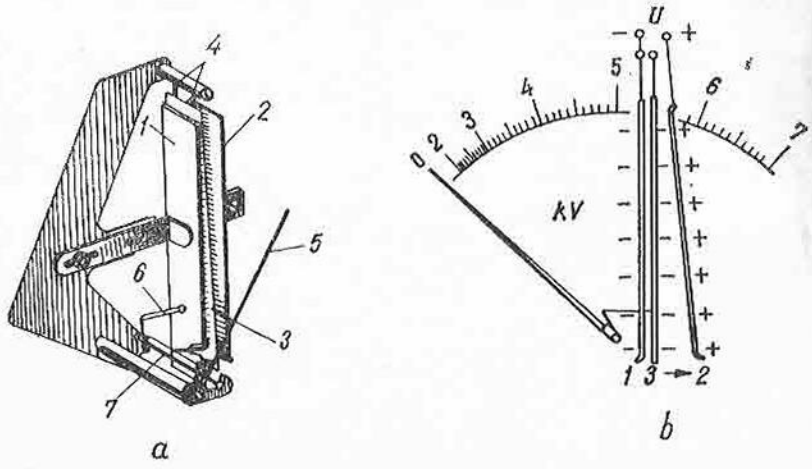


Fig. 2.16. **Dispozitivul de măsurat electrostatic cu variaţia distanţei dintre armături.**

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

Cuplul activ al dispozitivelor de măsurat electrostatice este proporţional cu pătratul tensiunii aplicate U :

$$M_a = k\,U^2$$

La echilibrul echipajului mobil cuplul activ fiind egal cu cuplul rezistent ($M_a = M_r = D\alpha$), se deduce ecuaţia caracteristică a scării :

$$\alpha = \frac{k}{D}U^2 = K\,U^2.$$

● **Caracteristici.** Caracteristica scării arată că *deviaţia sistemului mobil depinde de pătratul tensiunii*. Ca urmare, scara gradată a aparatului este neuniformă. Prin alegerea unor anumite forme şi dimensiuni pentru plăcile fixe şi mobile se poate obţine la dispozitivul de măsurat cu variaţia suprafeţei active a armăturilor, o scară gradată aproape uniformă. La dispozitivele de măsurat cu variaţia distanţei 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 şi tensiunea, iar forţa de acţiune reciprocă dintre plăci rămîne îndreptată în aceeaşi direcţie. Deviaţia echipajului mobil este determinată de valoarea cuplului activ mediu în cursul unei perioade, proporţională cu pătratul valorii eficace a tensiunii aplicate.

Dispozitivele de măsurat electrostatice nu sînt influenţate de temperatura mediului înconjurător, de cîmpurile magnetice exterioare, de frecvenţa sau de forma curbei mărimii de măsurat, astfel că acestea nu constituie surse de erori. Asupra funcţionării dispozitivelor de măsurat electrostatice *au o mare influenţă doar cîmpurile electrice exterioare*, deoarece cîmpul electric propriu este relativ mic. Pentru micşorarea acestei influenţe, 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 şi 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.

6. Dispozitivele de măsurat logometrice

Logometrele sînt dispozitive de măsurat care măsoară raportul a doi curenți sau tensiuni.

Oricare dintre tipurile de dispozitive de măsurat (cu excepția celor electrostatice) 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 dintre ele acționînd unul din curenți. Aceste elemente îmbinate formează echipajul mobil al logometrului. Sensul celor doi curenți este astfel ales încît cuplurile create de fiecare dintre 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 echipajul mobil se rotește ; pe măsura rotirii, cuplul mai mare (activ) se micșorează, iar cel mai mic (rezistent) crește, pînă la echilibrarea echipajului mobil cînd cuplurile devin egale. Pentru aceasta cuplurile active (amîndouă sau cel puțin unul dintre ele) depind de unghiul de rotație a echipajului mobil.

Dacă dependența celor două cupluri de unghiul de rotație este diferită, deviația echipajului mobil al logometrelor este funcție de raportul curenților I_1 și I_2 prin cele două bobine mobile :

$$\alpha = f\left[\frac{I_1}{I_2}\right].$$

Deoarece logometrele nu au cuplu rezistent mecanic, cînd nu trece curent prin aparat asupra echipajului 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.

Logometrele magnetoelectrice, electrodinamice și ferodinamice au echipajul mobil constituit 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. 2.17, *a*) și ferodinamice (fig. 2.17, *c*) prin crearea unui cîmp magnetic variabil cu deviația α realizat cu un întrefier neuniform, iar la dispozitivele electrodinamice (fig. 2.17, *b*), prin variația inductanței mutuale cu deviația α (dispozitivele cu cîmp magnetic uniform). Se construiesc și logometre ferodinamice cu întrefier uniform (fig. 2.17, *d*), la care se realizează numai dependența unuia dintre cupluri (cel rezistent) de unghiul de rotire a echipajului mobil, închizîndu-se una dintre bobinele mobile pe o reactanță oarecare. În acest caz cuplul care acționează asupra acestei bobine depinde de deviația α, deoarece pe măsura rotirii bobinei crește tensiunea electromotoare indusă și ca urmare și curentul care ia naștere.

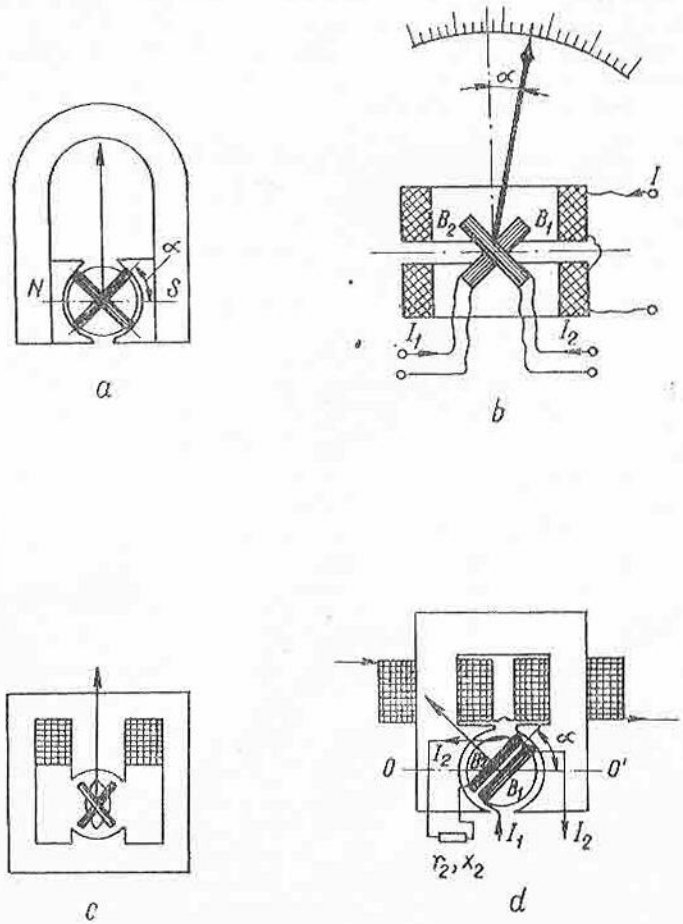


Fig. 2.17. **Logometre magnetoelectrice, electrodinamice și ferodinamice.**

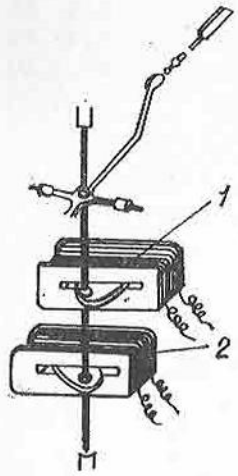


Fig. 2.18. **Logometrul feromagnetic.**

Logometrele feromagnetice (fig. 2.18) sînt constituite în general din două dispozitive identice de repulsie sau de atracţie montate pe acelaşi ax şi în opoziţie, astfel încît cele două cupluri sînt de sens contrar.

Logometrele magnetoelectrice au cea mai mare utilizare fiind folosite la măsurarea rezistenţelor (ohmmetre) şi a mărimilor neelectrice. Celelalte tipuri de logometre se folosesc mai ales la măsurarea frecvenţei, factorului de putere, capacităţii etc.

REZUMAT

- **Principiul de funcţionare**

  — transformarea energiei electrice sau magnetice a mărimii de măsurat (sau a semnalului electric intermediar) în energie mecanică ce produce mărimea perceptibilă (deplasarea unui echipaj mobil) ;

  — cuplurile mecanice care acţionează asupra dispozitivului de măsurat : cuplul activ, cuplul rezistent, cuplul de frecări ;

  — condiţia de echilibru a dispozitivului de măsurat pentru care se obţine deviaţia permanentă corespunzătoare mărimii măsurate :

  cuplul activ + cuplul rezistent + cuplul de frecări = 0.

- **Părţi componente**

Dispozitivul de măsurat :

— elemente active :
  — echipaj fix ;
  — echipaj mobil ;

— elemente auxiliare :
  — dispozitivul de producere a cuplului rezistent ;
  — corectorul de zero ;
  — dispozitivul de citire ;
  — amortizorul.

Traductorul : şunturi, rezistenţe adiţionale, transformatoare de măsurat, elemente termoelectrice, fotoelectrice etc.

Accesoriile : cutia, bornele etc.

- **Dispozitivele de măsurat**

— magnetoelectrice :
  — cu magnet fix şi bobină mobilă ;
  — cu magnet mobil şi bobină fixă ;

— feromagnetice :
  — de atracţie ;
  — de repulsie ;

— electrodinamice ;

— ferodinamice ;

— de inducţie :
  — cu flux unic ;
  — cu fluxuri multiple ;

— electrostatice :
  — cu variaţia suprafeţei active a armăturilor ;
  — cu variaţia distanţei dintre armături.

— termice cu fir cald ;

— bimetalice ;

— cu termocuplu = dispozitiv magnetoelectric + termocuplu ;

— cu redresor = dispozitiv magnetoelectric + redresor ;

— cu lame vibrante ;

— logometrice.

ÎNTREBĂRI DE CONTROL

1. Care este principiul de funcţionare al aparatelor de măsurat analogice ?
2. Care este condiţia de echilibru a aparatelor de măsurat analogice ? Aplicaţii pentru diferitele tipuri de dispozitive de măsurat.
3. Care sînt părţile componente ale dispozitivului de măsurat al aparatelor de măsurat analogice ? Exemplificarea acestora pentru diferitele tipuri de dispozitive de măsurat.
4. Să se calculeze rezistenţa şunturilor necesare pentru a se mări domeniul de măsurare al unui miliampermetru, avînd curentul nominal $I = 5$ mA, şi rezistenţa internă $R_a = 10\ \Omega$ pentru limitele de 30 mA, 500 mA şi 1,5 A. Se va desena schema şi modul de legare a miliampermetrului în circuitul de măsurare.
5. Care este rolul rezistenţelor adiţionale ? Se va calcula valoarea rezistenţelor adiţionale corespunzătoare limitelor de măsurare 15 V, 30 V şi 300 V pentru un dispozitiv de măsurat avînd tensiunea nominală $U_a = 0{,}1$ V şi rezistenţa internă $R_a = 10\ \Omega$. Se va desena schema şi modul de legare a voltmetrului în circuitul de măsurare.
6. Care sînt principalele caracteristici ale dispozitivelor de măsurat magnetoelectrice ?

7. Care sînt posibilităţile de uniformizare a scării dispozitivelor de măsurat feromagnetice ?

8. Cum se poate elimina influenţa cîmpurilor magnetice exterioare asupra dispozitivelor de măsurat feromagnetice şi electrodinamice ?

9. Să se descrie funcţionarea dispozitivului de inducţie cu trei fluxuri cu cîmp magnetic de fugă.

10. Care este principiul de funcţionare al dispozitivelor de măsurat electrostatice ? Descrierea tipurilor constructive.

11. Ce sînt logometrele şi care este principiul de funcţionare ?

CAPITOLUL III

Măsurarea curenţilor şi tensiunilor

Curenţii şi tensiunile care se măsoară în practica industrială sau de laborator pot avea valori foarte diferite, de la ordinul microamperilor şi microvolţilor pînă la sute de amperi şi mii de volţi, cu frecvenţe variind de la zero (curent continuu) pînă la sute de megaherţi. Metodele şi aparatele pentru măsurarea unui domeniu atît de larg de curenţi şi tensiuni diferă după ordinul de mărime al acestora şi după precizia cu care trebuie efectuată măsurarea. *În general, curenţii şi tensiunile se măsoară prin metode de citire cu aparate indicatoare* (galvanometre, ampermetre şi voltmetre) de tipuri diferite după domeniul de măsurare. *În măsurările de mare precizie se utilizează metode de compensaţie.*

A. Măsurarea curenţilor şi tensiunilor foarte mici cu galvanometrul

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

Galvanometrele sînt *aparate de foarte mare sensibilitate* ($10^{5}...10^{11}$ mm/A) *care se utilizează fie ca aparate indicatoare pentru măsurarea valorilor foarte mici ale curenţilor, tensiunilor sau cantităţilor de electricitate, fie ca aparate de zero în metode de comparaţie, pentru a indica lipsa curentului sau tensiunii într-un circuit.*

Galvanometrele pot fi fixe sau portative. Galvanometrele fixe se construiesc cu indicator cu oglindă şi spot luminos şi riglă gradată exterioară (v. fig. 2.4, *a*), iar cele portative — cu indicator cu oglindă şi spot luminos şi cadran interior (v. fig. 2.4, *b*) sau cu ac indicator.

Se construiesc galvanometre de diverse tipuri ; cele mai utilizate sînt galvanometrele magnetoelectrice cu bobină mobilă, folo-

site atît în curent continuu cît și în curent alternativ, sau cu magnet mobil, utilizate numai în curent alternativ.

● **Galvanometrul magnetoelectric cu bobină mobilă.** Galvanometrul magnetoelectric cu bobină mobilă, constructiv se aseamănă foarte mult cu dispozitivul de măsurat magnetoelectric descris în capitolul II. Deosebirile 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* de aur sau de argint, foarte subțire și buclat pentru a nu influența mișcarea echipajului 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, echipajul mobil al galvanometrului se oprește la noua poziție de echilibru,

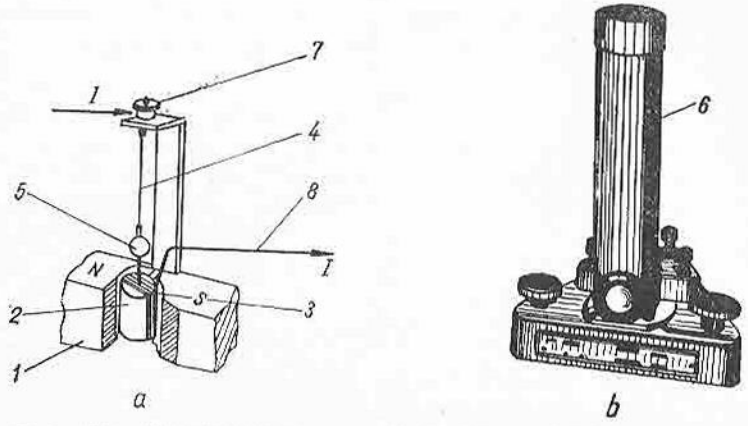


Fig. 3.1. **Galvanometrul magnetoelectric cu bobină mobilă :** *a* — dispozitivul de măsurat ; *b* — vedere exterioară.

printr-o mișcare de stabilire, care poate fi *oscilatorie amortizată* cînd rezistența exterioară este mare sau *aperiodică* (o singură mișcare) cînd rezistența este sub o anumită valoare denumită *rezistență critică exterioară*. Galvanometrul trebuie utilizat conectat pe această rezistență, deoarece acesteia îi corespunde timpul minim de oprire a echipajului mobil.

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

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

Pentru măsurarea și detectarea curenților alternativi se utilizează **galvanometrele de rezonanță.** Acestea sînt galvanometre de tip magnetoelectric, echipajul 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 echipajului 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. 3.2) se compune dintr-un *electromagnet 1*, alimentat cu cu-

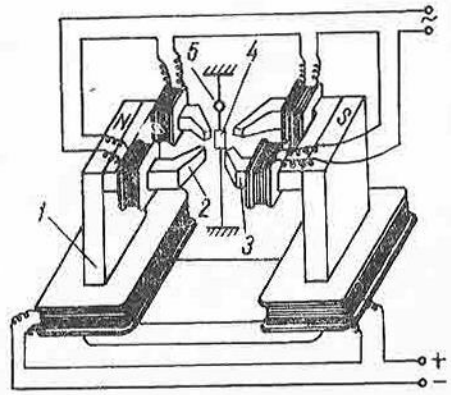


Fig. 3.2. **Dispozitivul de măsurat al galvanometrului de rezonanță cu plăcuță mobilă magnetizată.**

rent continuu, de ai cărui poli 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 benzi tensionate care creează în același timp și cuplul rezistent, împreună cu fluxul magnetic continuu. Pe una dintre benzile tensionate este fixată și *oglinda* 5 a indicatorului cu spot luminos.

Piesele polare 2 și 3 poartă cîte o înfășurare de magnetizare prin care trece curentul alternativ de măsurat, transformîndu-se astfel în cîte 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 rezultant. Unul dintre fluxuri fiind constant iar cel de-al doilea variind periodic ca mărime și ca sens, fluxul rezultant 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 celui 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 de rezonanță cu bobină mobilă are o construcție similară celei a unui galvanometru de curent continuu. Bobina sa mobilă are o formă alungită și îngustă, fără cadru, ceea ce face să aibă un moment de inerție foarte mic.

B. Măsurarea curenților și tensiunilor cu ampermetrul și voltmetrul

În circuitele de curent continuu și de curent alternativ curenții care depășesc 10^{-6} A se măsoară cu ampermetrul iar tensiunile mai mari de 10^{-4} V — cu voltmetrul.

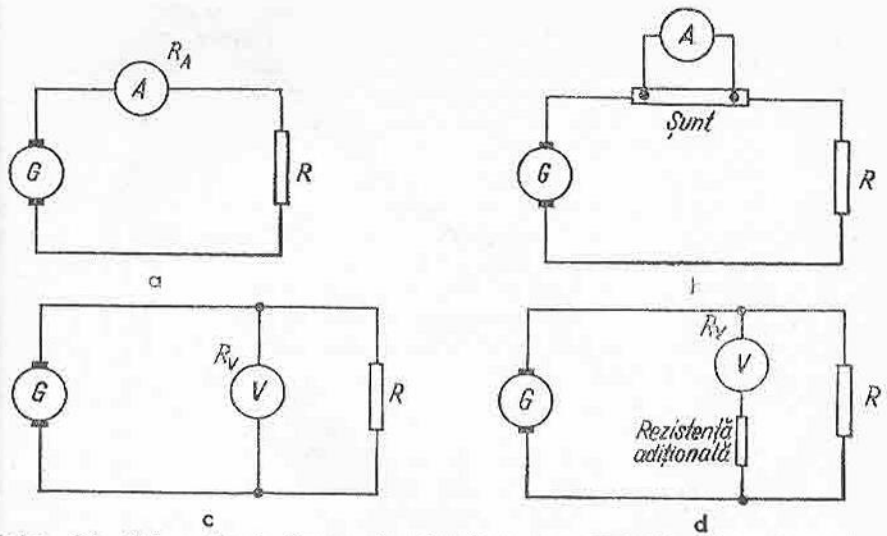


Fig. 3.3. Schemele de legare în circuit a ampermetrelor și voltmetrelor.

Ampermetrele se leagă în circuitele de măsurare în serie (fig. 3.3, a și b), iar voltmetrele în paralel cu punctele între care se măsoară tensiunea (fig. 3.3, c și d).

În funcție de valoarea curentului sau a tensiunii de măsurat ampermetrele se conectează în circuit direct (fig. 3.3, *a*) sau în paralel cu un șunt (fig. 3.3, *b*), iar voltmetrele direct (fig. 3.3, c) sau în serie cu o rezistență adițională (fig. 3.3, *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. *Curenții și tensiunile foarte mari se măsoară cu ampermetrele și voltmetrele prin intermediul* **transformatoarelor de măsurat** (fig. 3.4).

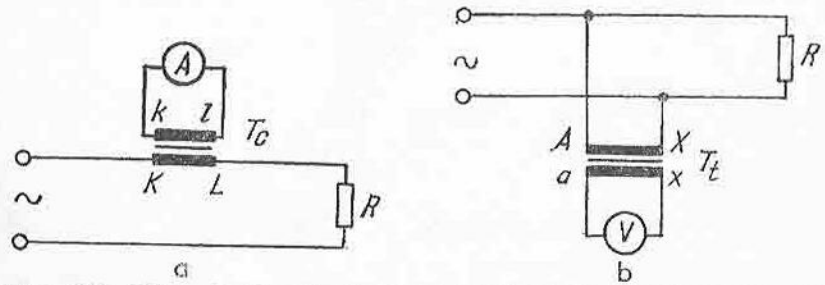


Fig. 3.4. Schemele de măsurare cu ajutorul transformatoarelor de măsurat :
a — măsurarea curentului ; *b* — măsurarea tensiunii.

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 introducînd 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 atît mai mare cu cît 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 cît mai mici, *rezistența ampermetrelor trebuie să fie cît mai mică, iar rezistența voltmetrelor cît mai mare în comparație cu rezistența circuitului de măsurare.*

Ca ampermetru sau ca voltmetru poate fi folosit oricare dintre dispozitivele de măsurat, cu excepția dispozitivelor electrostatice care nu pot fi folosite decît 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 $I = I_v = \frac{U_x}{R_v}$ și deci deviația sistemului mobil este :

$$\alpha = f(I) = f\left[\frac{U_x}{R_v}\right] = f(U_x).$$

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 aparatele 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 milivoltilor și voltilor) 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 tot prin intermediul 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.

● **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.

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 (pînă la 50-100 A respectiv 600—750 V) sau exterioare aparatului, individuale sau calibrate.

La „Întreprinderea de aparate electrice de măsurat" din Timișoara se fabrică aparate magnetoelectrice de tablou tip M8, M9, M10 și M 11 în clasa de precizie 1,5 pentru măsurări în instalațiile electrice industriale.

● **Ampermetre și voltmetre feromagnetice.** *Ampermetrele și voltmetrele feromagnetice sînt cele mai utilizate aparate de măsurat curenții și tensiunile alternative* datorită simplității și siguranței în funcționare. 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 încît prin aceasta trece întregul curent 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 dispozivului 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.

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. 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 și 600 V. Pentru măsurarea tensiunilor peste 600 V voltmetrele feromagnetice se folosesc împreună cu transformatoare de măsurat de tensiune.

„Întreprinderea de aparate electrice de măsurat" din Timișoara produce aparate de tablou de clasa 1,5 cu ax central sau cu ax lateral.

● **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. 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. 3.5, *a*), pentru aceste valori ale curentului fiind posibilă alimentarea bobinei mobile prin arcurile spirale. Ampermetrele pentru curenți peste 0,5 A se construiesc cu bobinele legate în paralel (fig. 3.5, *b*), sau cu bobina mobilă legată în paralel cu un șunt montat în serie cu bobina fixă (fig. 3.5, *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.

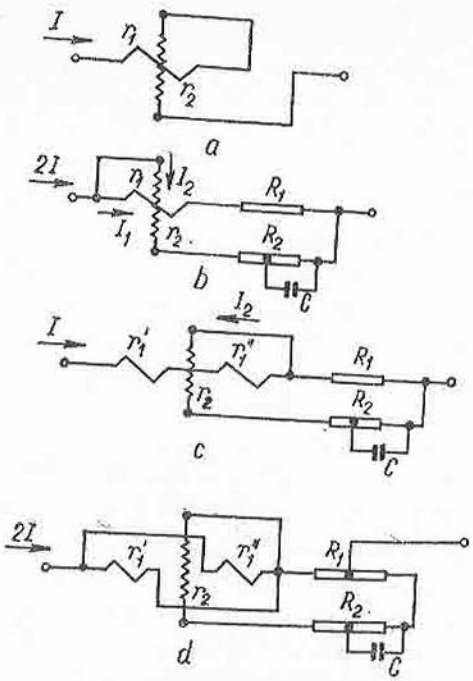


Fig. 3.5. **Schemele de conexiuni ale bobinelor ampermetrelor electrodinamice.**

Ampermetrele electrodinamice și ferodinamice 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 ferodinamice au bobinele fixă și mobilă legate în serie, împreună cu o rezistență adițională cu ajutorul căreia se pot obține diferite domenii de măsurare (fig. 3.6).

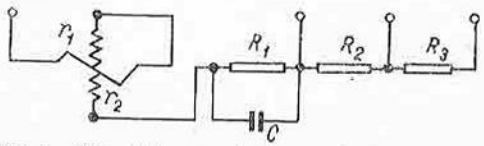


Fig. 3.6. **Schema de conexiuni a voltmetrelor electrodinamice.**

Scara gradată a voltmetrelor are același caracter ca și scara gradată a ampermetrelor.

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

● **Voltmetre electrostatice.** *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).

Pentru mărirea sensibilității aparatelor de măsurat electrostatice și prin urmare pentru folosirea lor la limite mai mici de măsurare, dispozitivele de măsurat electrostatice cu suprafață 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. 3.7.). 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* (fig. 3.8, *a*) și *divizoarelor de tensiune capacitive* (fig. 3.8, *b*) în curent alternativ și cu ajutorul *divizoarelor de tensiune rezistive* în curent continuu.

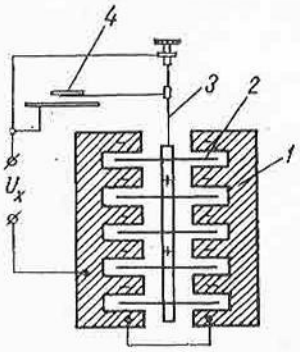


Fig. 3.7. **Voltmetru electrostatic multicelular ecranat :**
1 — plăcile fixe ; *2* — plăcile mobile ; *3* — fir de suspensie purtînd acul indicator sau oglinda ; *4* — acul indicator.

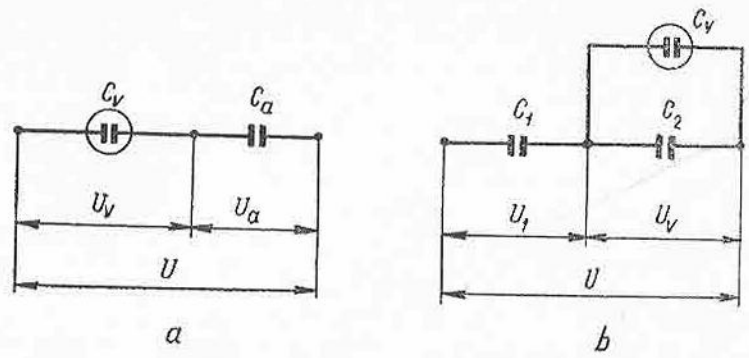


Fig. 3.8. **Extinderea domeniului de măsurare a voltmetrelor electrostatice.**

C. 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).

● **Elemente redresoare.** 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. 3.9).

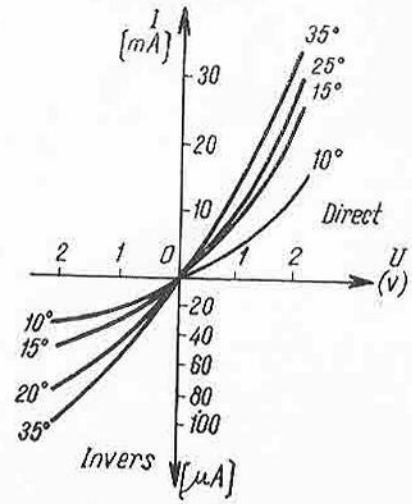


Fig. 3.9. **Caracteristica statică curent-tensiune a diodelor semiconductoare cu cuproxid.**

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, iar cea în 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 *tensiunea inversă* U_i. Peste o anumită valoare a tensiunii inverse, denumită *tensiunea 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 :

$$K = \frac{I_d}{I_i} = \frac{R_i}{R_d}.$$

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, astfel 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 cuproxid permit măsurări cu erori acceptabile numai pînă la 5—10 kHz, iar cele cu germaniu și în special cele cu siliciu — pînă la 1 MHz și chiar mai mult. Diodele cu siliciu au o stabilitate mai mare a caracteristicilor la variațiile de temperatură și îmbătrînire.

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

● **Circuite redresoare.** 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 redresate se deosebesc *circuite redresoare cu simplă redresare* (fig. 3.10) *și circuite redresoare cu dublă redresare* (fig. 3.11).

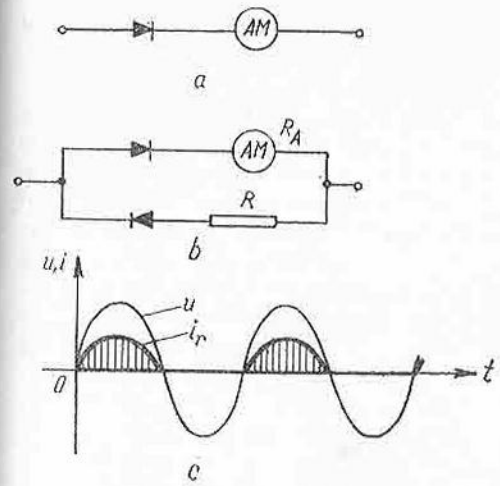


Fig. 3.10. **Circuite redresoare cu simplă redresare.**

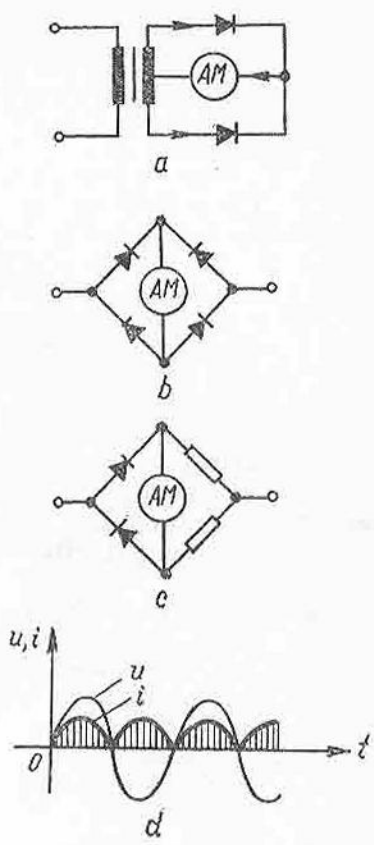


Fig. 3.11. **Circuite redresoare cu dublă redresare.**

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 prin aparatul de măsurat *AM* circulă 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 se 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_d a aparatului de măsurat, care servește la egalizarea rezistențelor din cele două ramuri în paralel.

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

Circuitele redresoare cu dublă redresare redresează ambele alternanţe ale curentului alternativ, mărind astfel la dublu valoarea curentului redresat (pentru curenţi sinusoidali $I_r = 0{,}9\ I$). Cele mai folosite circuite cu dublă redresare sînt *circuitul cu transformator cu priză mediană* (fig. 3.11, *a*) *şi circuitele în punte* (fig. 3.11, *b* şi *c*). În aceste circuite redresoarele sînt astfel legate încît, pentru ambele direcţii ale curentului alternativ, curentul redresat circulă prin aparatul de măsurat *AM* în acelaşi sens (fig. 3.11, *d*). Circuitele redresoare în punte cu două redresoare şi două rezistenţe (fig. 3.11, *c*) au calitatea de a fi mai puţin influenţate de variaţiile 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 dintre rezistenţe servind drept şunt.

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

● **Aparate de măsurat cu redresoare.** În funcţie de schemele de redresare folosite, deci de numărul alternanţelor redresate, se deosebesc *aparate cu simplă redresare* şi *aparate cu dublă redresare*. Aparatele cu simplă redresare se folosesc rar, deoarece curentul trecînd numai în cursul unei singure alternanţe prin dispozitivul de măsurat, cuplul activ şi deci sensibilitatea sînt mici.

Curentul redresat care trece prin dispozitivul de măsurat al aparatelor cu redresor este pulsatoriu şi ca urmare şi cuplul activ creat de el este pulsatoriu. Din cauza inerţiei, echipajul mobil nu reuşeşte să urmărească variaţiile cuplului activ, pulsatoriu şi rămîne într-o poziţie medie, corespunzătoare valorii medii a cuplului.

Ca urmare ecuaţia caracteristică a scării dispozitivului de măsurat magnetoelectric în acest caz devine :

$$\alpha = \frac{BSn}{D} I_{med}.$$

Din această relaţie rezultă că *indicaţiile aparatelor cu redresoare sînt proporţionale cu valoarea medie a curentului alternativ*. În circuitele de curent alternativ însă este necesar în mod obişnuit 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 obişnuit, pentru sinusoidă). La schimbarea formei curbei curentului de măsurat apare o eroare suplimentară ; mărimea acestei erori depinde de aba-

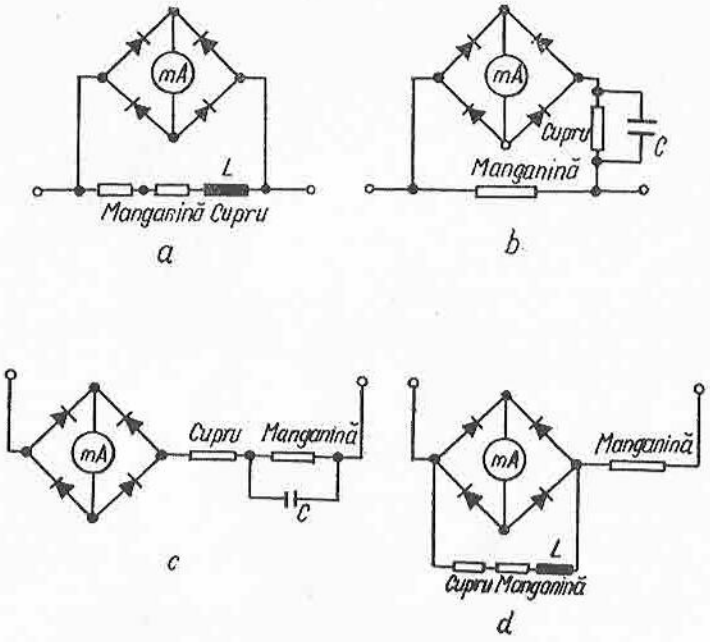


Fig. 3.12. **Schemele aparatelor cu redresoare :**
a — ampermetre pentru curenţi mici ; *b* — ampermetre pentru curenţi mari ; *c* — voltmetre pentru tensiuni mici ; *d* — voltmetre pentru tensiuni mari.

terea factorului de formă a curentului nesinusoidal faţă de valoarea 1,11 a acestui factor în curent sinusoidal.

Aparatele cu redresoare se folosesc la măsurarea curenţilor şi tensiunilor în asociaţie cu şunturile sau rezistenţe adiţionale la fel ca şi aparatele magnetoelectrice. Rezistenţele adiţionale şi şunturile se leagă în circuitul de curent alternativ şi nu în cel de curent redresat, pentru a se reduce valoarea tensiunii sau curentului aplicate elementelor redresoare. Schemele ampermetrelor şi voltmetrelor cu redresoare sînt astfel realizate încît asigură în acelaşi timp extinderea limitei de măsurare cît şi compensarea erorilor de temperatură şi de frecvenţă (fig. 3.12).

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

Există multe construcţii de aparate universale cu redresoare, diferind ca domenii de măsurare şi performanţe. În figura 3.13 sînt reprezentate schema şi aspectul exterior ale unui voltampermetru

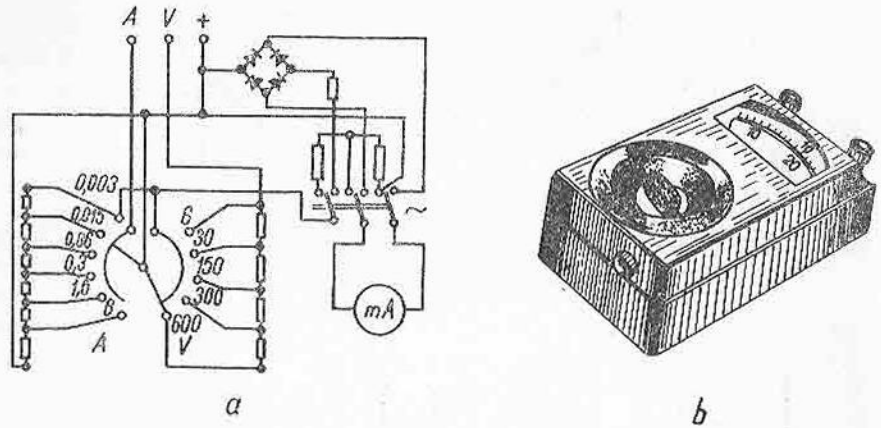


Fig. 3.13. **Aparat universal cu redresor.**

cu șase limite de măsurare pentru curenți (între 3 mA și 6 A) și tensiuni (între 6 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.

D. 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 dintre capete.* Prin încălzirea capătului activ (cu sudură) al termocuplului cu ajutorul curentului de măsurat, între capetele libere apare o tensiune electromotoare. Dispozitivul magnetoelectric, fiind legat la capetele libere ale termocuplului, măsoară curentul datorită acestei tensiuni termoelectromotoare. Tensiunea termoelectromotoare dezvoltată de termocuplu este proporțională cu diferența dintre temperatura capătului activ și cea a capătului liber. La rîndul 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 rhodiu (pînă la 1 000°C) etc. Firul încălzitor se confecționează din material nemagnetic de mare rezistență (constantan, crom-nichel, aliaj de platină cu iridiu etc.).

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

La aparatele cu contact (fig. 3.14. *a* și *b*) capătul activ al termocuplului este sudat sau fixat de firul încălzitor prin care trece curentul de măsurat, fiind încălzit prin contact direct de către acesta. 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. Termocuplurile fără contact pot fi legate în serie (fig. 3.14, *d*), ceea ce permite mărirea tensiunii 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 făcîndu-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).

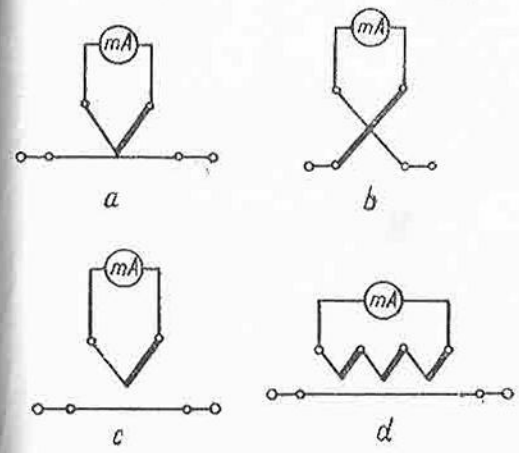


Fig. 3.14. **Schema aparatelor cu termocuplu.**

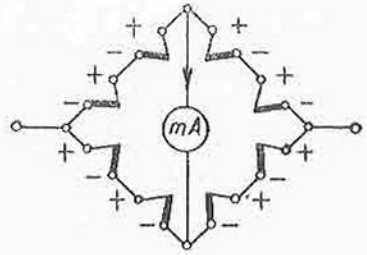


Fig. 3.15. **Schema de punte a aparatelor cu termocuplu.**

Aparatele cu termocuplu, pentru curenți mici (de la 1 mA pînă la 1 A) se construiesc cu termocuplul așezat în vid. Aparatele cu termocuplu, pentru curenți mari (pînă la 150—300 A) în care se degajează 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 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.

REZUMAT

- **Metode de măsurare a curenților și tensiunilor :**

  — metode de citire cu aparate indicatoare (ampermetre și voltmetre) ;
  — metode de compensație.

- **Aparate de măsurat curenți și tensiuni :**

  În curent continuu :

  — galvanometre magnetoelectrice ;
  — ampermetre și voltmetre magnetoelectrice ;
  — ampermetre și voltmetre electrodinamice ;
  — voltmetre electrostatice ;
  — ampermetre și voltmetre cu termocuplu ;

  În curent alternativ :

  — galvanometre de rezonanță ;
  — ampermetre și voltmetre magnetoelectrice cu redresoare ;

  — ampermetre și voltmetre magnetoelectrice cu termocuplu ;
  — ampermetre și voltmetre feromagnetice ;
  — ampermetre și voltmetre electrodinamice și ferodinamice ;
  — ampermetre termice cu fir cald .

ÎNTREBĂRI DE CONTROL

1. Care sînt aparatele destinate măsurării curenților și tensiunilor foarte mici ? Care sînt principalele caracteristici constructive ale galvanometrelor ?
2. Ce este galvanometrul de rezonanță și care sînt principalele deosebiri constructive între diferitele sale tipuri ?
3. Care sînt aparatele indicatoare care servesc la măsurarea curenților și tensiunilor și care este modul lor de conectare în circuit ?
   Care sînt condițiile pe care trebuie să le îndeplinească aceste aparate pentru ca eroarea sistematică de metodă să fie cît mai mică ?
4. Care sînt tipurile constructive de aparate de măsurat care se folosesc la măsurarea curenților și tensiunilor și care sînt domeniile lor de utilizare ?
5. Ce sînt aparatele magnetoelectrice cu redresoare, care este principiul lor de funcționare și care sînt tipurile constructive ?
6. Care sînt principalele caracteristici ale aparatelor cu termocuplu ?
7. Cum se măsoară curenții și tensiunile foarte mari ? Care sînt schemele de măsurare cu ajutorul transformatoarelor de măsurat ?

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.*

Rezistențele folosite în circuitele electrice și electronice au valori de la cîteva fracțiuni de ohm pînă la 10^{16} Ω, în gama frecvențelor de la curent continuu pînă la sute de megaherți.

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,* iar pentru măsurări industriale *metoda ampermetrului* și *voltmetrului* sau *aparate indicatoare.*

A. Măsurarea rezistențelor prin metode de punte

Metodele de punte *sînt metode de comparație 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.

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.

După mărimea care se măsoară, punțile pot fi alimentate în curent continuu sau în curent alternativ. *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 Ω și 1 MΩ, și *puntea dublă Thomson,* pentru rezistențe foarte mici, sub 1 Ω pînă la 10^{-6} Ω.

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 $10^{-7}...10^{-9}$ A/mm) ca aparat de zero într-una din diagonalele patrulaterului, iar în cealaltă diagonală o sursă de curent continuu (de 1,5...4 V) și o rezistență pentru limitarea curentului în circuit.

Echilibrarea electrică a punții Wheatstone se realizează prin variația rezistențelor cunoscute din laturile patrulaterului, pînă cînd curentul prin diagonala 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 în care căderile de tensiune în laturile *AC* și *AD* și, respectiv, în laturile *CB* și *DB* sînt egale, adică :

$$U_{AC} = U_{AD} \quad \text{și} \quad U_{CB} = U_{DB}$$

sau, cu notațiile din figura 4.1 :

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \qquad \text{și} \qquad I_1 R_x = I_2 R_3$$

Făcîndu-se raportul dintre aceste două relații, se obține *condiția de echilibru a punții Wheatstone :*

$$\boxed{\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3}}$$

sau :

$$R_1 R_3 = R_2 R_x$$

Se observă că condiția de echilibru a punții depinde numai de cele patru rezistențe din laturile patrulaterului, fiind independentă de rezistențele interne ale sursei de curent și aparatului indicator de zero.

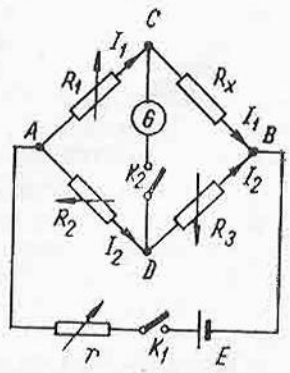


Fig. 4.1. Schema punții Wheatstone.

Din condiția de echilibru rezultă *valoarea rezistenței de măsurat :*

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$$

Rezistențele cunoscute R_1 și R_2 constituie *rezistențele de raport*, iar rezistența R_3 — *rezistența de comparație.*

Rezistențele de raport sînt rezistențe variabile de 1 + 10 + + 100 + 1000 Ω, 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 variabilă în decade cu valori între 10^{-1} și 10^5 Ω.

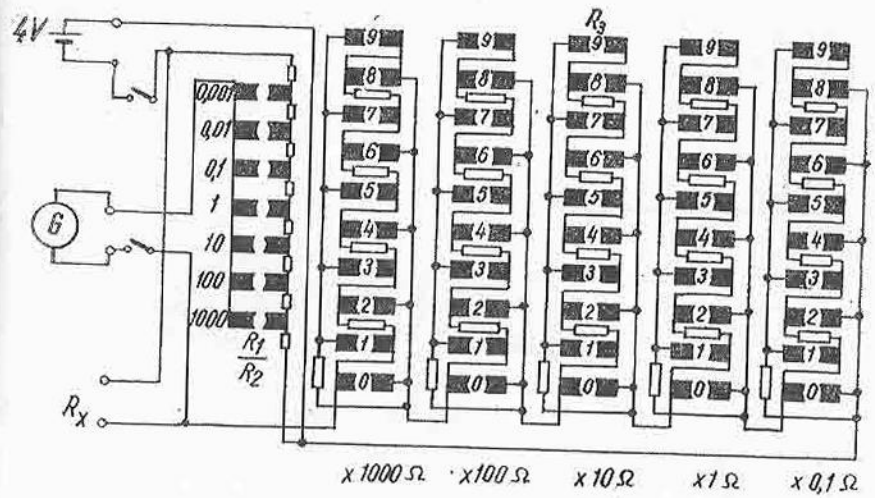
Practic, echilibrul punții Wheatstone se obține fie fixîndu-se rezistențele R_1 și R_2 într-un raport constant și variindu-se rezistența de comparație R_3, fie invers, menținîndu-se constantă rezistența de comparație R_3 și variindu-se raportul dintre rezistențele R_1 și R_2.

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_3' și R_3'' ($R_3'' > R_3'$) foarte apropiate ale rezistenței de comparație. În acest caz, rezistența de echilibru se află prin *metoda interpolării* calculîndu-se cu relația :

$$R_{3i} = R_3' + (R_3'' - R_3') \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

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 Ω și 10^6 Ω. În afara acestor limite erorile de măsurare cresc foarte mult ; în cazul rezistențelor de măsurat sub 1 Ω, datorită influenței rezistențelor conductoarelor de legătură și a rezistențelor de contact a bornelor de conectare la punte a rezistenței de măsurat, iar în cazul rezistențelor de măsurat peste 10^6 Ω, datorită reducerii sensibilității punții din cauza micșorării curenților în laturile patrulaterului.

Realizările constructive ale punții Wheatstone sînt diferite. Punțile de precizie se construiesc cu raport constant și rezistența de comparație variabilă (fig. 4.2, *a*). Pentru măsurări curente în atelierele de montaj sau de reparații electrice se folosesc punți cu raport variabil, realizat cu ajutorul unui reostat cu fir calibrat cu cursor (fig. 4.2, *b*). Aceste punți au în general montate pe ele un galvanometru și funcționează cu baterii uscate. Punțile cu fir calibrat cu cursor se manipulează mai usor, dar au o precizie mai redusă.



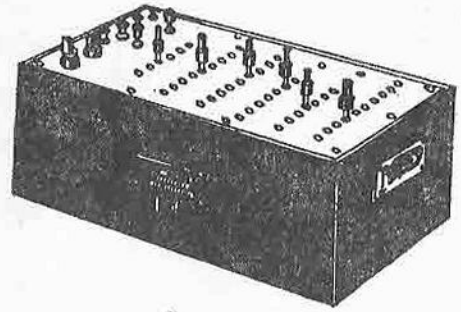
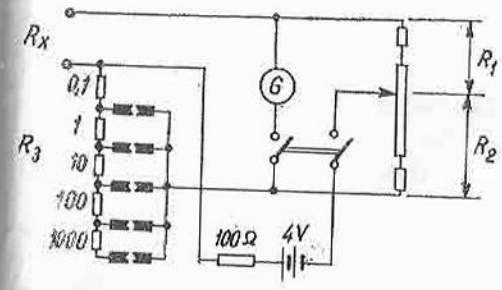
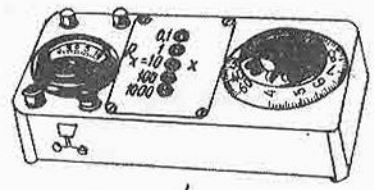


Fig. 4.2. **Schema punților Wheatstone :** *a* — cu raport constant ; *b* — cu raport variabil.

a





b

2. Puntea dublă Thomson

Rezistențele mici (sub 1 Ω, pînă la 10^{-6} Ω) 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.

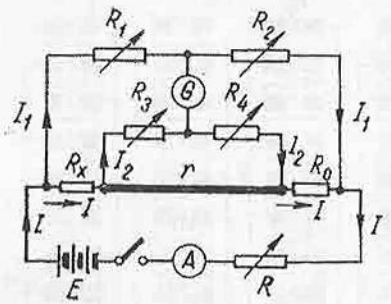


Fig. 4.3. **Schema punții duble Thomson.**

Rezistența de măsurat R_x (fig. 4.3) 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 laturile punții.

Legătura dintre rezistențele R_x și R_0 se face cu un conductor de secțiune mare și lungime mică, avînd rezistența r cît mai mică ($r \approx 0$).

Pentru echilibrarea punții se ia $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ (în acest scop rezistențele R_1 și R_3, respectiv R_2 și R_4 constructiv sînt cuplate mecanic) și se variază fie rezistența etalon R_0, fie simultan rezistențele R_1 și R_3. La echilibru se obține pentru rezistența de măsurat R_x o expresie asemănătoare celei din cazul punții Wheatstone :

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}.$$

Rezistențele R_1, R_2, R_3 și R_4 trebuie să capete valori cît mai mari (minimum 10 Ω) pentru ca rezistența conductoarelor de legătură și a contactelor să fie neglijabile.

Precizia măsurărilor cu puntea dublă poate ajunge pînă la 0,1%.

B. Măsurarea rezistențelor cu ampermetrul și voltmetrul

1. 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 în care se leagă voltmetrul în circuit, astfel :

— **montajul aval** (fig. 4.4, 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 un curent I egal cu suma curenților I_x, care trece prin rezistența de măsurat R_x și $I_v = \frac{U}{R_v}$, absorbit de voltmetru (R_v fiind rezistența internă a voltmetrului) ;

— **montajul amonte** (fig. 4,4, *b*), în care voltmetrul este montat între borna de intrare a ampermetrului și borna de ieșire a rezistenței de măsurat, măsurînd astfel o cădere de tensiune U egală cu suma căderilor de tensiune U_x în rezistență și $U_A = R_A I$ în ampermetru (R_A fiind rezistența internă a ampermetrului), iar ampermetrul măsoară curentul I_x care trece prin rezistență.

Rezistența de măsurat R_x fiind determinată de raportul dintre căderea de tensiune U de la bornele sale și curentul I_x care trece prin ea $\left(R_x = \frac{U_x}{I_x}\right)$, *dacă se folosesc pentru calcul indicațiile U și I ale aparatelor de măsurat, ambele montaje prezintă o eroare sistematică de metodă.* De aceea pentru aflarea unei valori a rezistenței măsurate cît mai apropiată de valoarea adevărată trebuie să se facă corectarea rezultatelor obținute, ținîndu-se seama de consumul propriu al aparatelor de măsurat. În acest scop se utilizează următoarele relații :

— montajul aval :

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}}$$

— montajul amonte :

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U - R_A I}{I} = \frac{U}{I} - R_a$$

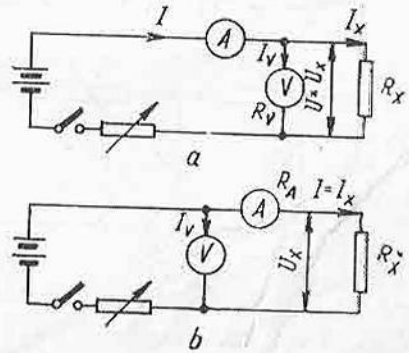


Fig. 4.4. **Schemele de măsurare a rezistențelor prin metoda ampermetrului și voltmetrului.**

Eroarea sistematică este determinată de raportul dintre rezistența de măsurat și valoarea rezistențelor interne ale aparatelor folosite ; ea este cu atît mai mică, în cazul montajului aval, cu cît rezistența de măsurat R_x este mai mică în comparație cu rezistența R_v a voltmetrului, iar în cazul montajului amonte, cu cît rezistența de măsurat R_x este mai mare în comparație cu rezistența R_A a ampermetrului. Rezultă că atunci cînd nu se cunosc rezistențele interne ale aparatelor de măsurat pentru a se obține o valoare măsurată $R_x = \frac{U}{I}$ cît mai apropiată de valoarea adevărată, *rezistențele mici (sub 1 Ω) se măsoară cu montajul aval, iar rezistențele mijlocii (pînă la 10^5 Ω) și mari (peste 10^5 Ω), 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%.

2. Metode de comparație

Aceste metode constau în compararea rezistenței de măsurat cu o rezistență etalon de același ordin de mărime. Măsurarea se poate face fie prin comparație directă, fie prin substituție.

● **Metoda de comparație directă** (fig. 4.5, a). În acest caz rezistența de măsurat R_x și rezistența etalon de comparație R_0 se montează în serie. Cu ajutorul unui voltmetru se măsoară succesiv (folosindu-se comutatorul K_1) căderile de tensiune U_x și U_0 în cele două rezistențe R_x și R_0 (cu care sînt proporționale) și se

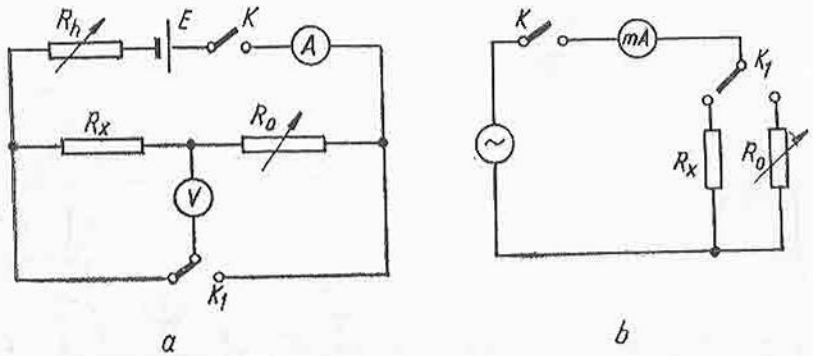


Fig. 4.5. **Măsurarea rezistențelor prin metoda de comparație.**

compară între ele. Curentul I prin cele două rezistențe fiind același, din relațiile $U_x = R_x I$ și $U_0 = R_0 I$ rezultă valoarea rezistenței de măsurat.

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}$$

Cu cît valorile rezistențelor R_x și R_0 sînt mai apropiate și rezistența voltmetrului mai mare, cu atît măsurarea este mai exactă. Din această cauză rezistența R_0 va fi reglabilă.

Această metodă este indicată pentru măsurarea rezistențelor mici.

● **Metoda substituției** (fig. 4.5, b). În acest caz rezistența de măsurat R_x se montează în paralel cu rezistența etalon de comparație R_0. Cele două rezistențe se compară între ele substituindu-se una cu cealaltă în circuitul de măsurare.

Cu ajutorul comutatorului K_1 se introduce mai întîi în circuitul de măsurare rezistența de măsurat R_x și apoi cea etalon R_0, care se reglează pînă cînd miliampermetrul mA va indica același curent în circuit. În această situație cele două rezistențe sînt egale, adică $R_x = R_0$.

Metoda substituției este precisă, precizia sa nedepinzînd de clasa de precizie a aparatului indicator ci numai de precizia rezistenței etalon R_0 și de modul în care sursa de alimentare E își menține constantă tensiunea electromotoare.

Metoda este indicată pentru măsurarea rezistențelor peste 1000 Ω, fiind des utilizată la măsurarea rezistențelor în domeniul frecvențelor audio (în acest caz ca sursă de alimentare se folosește un generator de frecvență acustică).

C. Măsurarea rezistențelor cu aparate indicatoare

Aparatele indicatoare folosite pentru măsurarea directă a rezistențelor se numesc **ohmmetre** sau **megohmmetre.**

Principiul de funcționare a ohmmetrelor și megohmmetrelor se bazează pe aplicarea legii lui Ohm $\left(R = \frac{U}{I}\right)$ *într-un circuit constituit, în esență, dintr-o sursă de curent continuu, un aparat indicator de curent și rezistența de măsurat.* La o tensiune constantă a sursei, intensitatea curentului în circuit este invers proporțională cu rezistența de măsurat și astfel aparatul indicator poate fi gradat în ohmi, căpătînd funcția de aparat de măsurat rezistențe.

Constructiv, ohmmetrele şi megohmmetrele se compun din aparatul indicator, sursa de curent continuu şi elementele de reglare, la bornele lor conectîndu-se rezistenţele de măsurat.

Precizia de măsurare a ohmmetrelor şi megohmmetrelor nu este mare, clasa lor de precizie fiind în cel mai bun caz 1,5. De aceea aceste aparate se folosesc, în general, pentru măsurări industriale.

1. Ohmmetre

Ohmmetrele sînt formate dintr-un mili- sau microampermetru magnetoelectric cu bobină mobilă, rezistenţe adiţionale variabile şi o baterie uscată de 1,5...4,5 V curent continuu.

În funcţie de modul de conectare a rezistenţelor de măsurat faţă de aparatul indicator, ohmmetrele pot fi cu montaj serie sau cu montaj paralel.

● **Ohmmetrul serie** (fig. 4.6, *a*) are rezistenţa de măsurat R_x conectată în serie cu aparatul indicator. Ca urmare, în momentul în care rezistenţa de măsurat R_x este egală cu zero (adică bornele ohmmetrului sînt scurtcircuitate) aparatul indicator va avea deviaţia maximă, iar cînd rezistenţa de măsurat R_x are valoarea maximă ($R_x = \infty$, adică bornele aparatului sînt neconectate) aparatul indicator, nefiind străbătut de curent, va avea deviaţia minimă. Rezultă că *scara ohmmetrului serie, gradată în ohmi, are sens invers faţă de aparatele de măsurat obişnuite* (deviaţia acului este cu atît mai mică cu cît rezistenţa de măsurat este mai mare). Scara gradată este neuniformă, diviziunile ei fiind mai dese pentru valorile mari ale rezistenţelor.

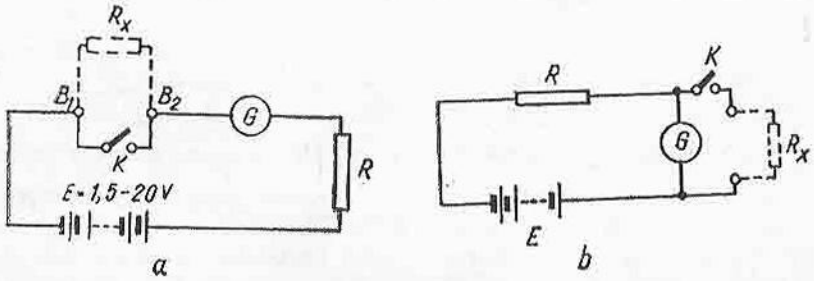


Fig. 4.6. **Schemele ohmmetrelor.**

● **Ohmmetrul paralel** (fig. 4.6, *b*) are rezistenţa de măsurat R_x conectată în paralel cu aparatul indicator. În acest caz aparatul indicator are deviaţia maximă cînd rezistenţa de măsurat are valoarea infinită, adică atunci cînd la bornele aparatului nu este conectată nici o rezistenţă şi deci tot curentul trece prin aparatul de măsurat, iar indicaţia zero corespunde valorii zero a rezistenţei de măsurat, adică atunci cînd bornele aparatului sînt scurtcircuitate. În consecinţă, *scara ohmmetrului paralel, gradată în ohmi, are sensul normal.*

Ohmmetrul serie se foloseşte la măsurarea rezistenţelor mari (peste 10^5 Ω), iar ohmmetrul paralel la măsurarea rezistenţelor mici şi mijlocii (10...10^5 Ω).

Deoarece tensiunea sursei de alimentare nu rămîne constantă în timp, scăzînd datorită creşterii rezistenţei interne a bateriei odată cu îmbătrînirea acesteia, ohmmetrele sînt prevăzute cu dispozitive de corecţie care compensează creşterea rezistenţei interne a bateriei. Compensarea se realizează *prin modificarea valorii rezistenţei adiţionale variabile* R_a (astfel ca suma rezistenţei acesteia şi a bateriei să rămînă constantă) sau *prin reglarea unui şunt magnetic* prevăzut în circuitul magnetic al aparatului magnetoelectric, care modificînd intensitatea cîmpului magnetic în întrefier schimbă sensibilitatea aparatului de măsurat (în sensul creşterii acesteia).

Corecţia ohmmetrelor se face înaintea fiecărei utilizări. Pentru aceasta, la ohmmetrele serie se scurtcircuitează bornele de conectare a rezistenţei de măsurat şi se reglează rezistenţa adiţională sau şuntul magnetic pînă cînd se aduce indicatorul la gradaţia zero. La ohmmetrele paralel, corecţia se face cu bornele neconectate (în gol) aducîndu-se indicatorul la diviziunea ∞.

Ohmmetrele se construiesc pentru mai multe domenii de măsurare, care se obţin cu ajutorul unor rezistenţe adiţionale montate în serie sau în paralel cu aparatul indicator.

2. Megohmmetre

Pentru măsurarea rezistenţelor foarte mari (peste 10^5 Ω) se folosesc megohmmetre. Aceste aparate au construcţia asemănătoare cu ohmmetrele serie, dar au ca sursă de tensiune un mic generator de curent continuu cu magnet permanent (magneton), acţionat manual, care furnizează o tensiune înaltă de 500, 1000 sau 2500 V. Ca aparat indicator se utilizează un miliampermetru magnetoelectric cu bobină simplă sau de tip logometric.

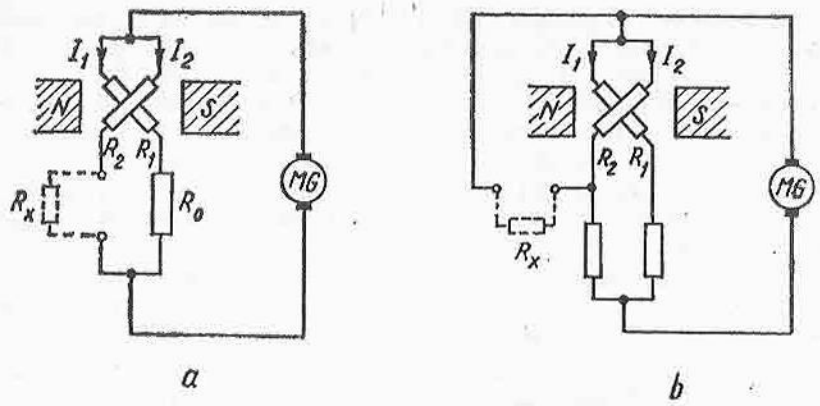


Fig. 4.7. **Schemele megohmmetrelor cu logometre magnetoelectrice.**

● **Megohmmetrul cu logometru magnetoelectric** are avantajul că indicaţia sa este independentă de tensiunea sursei de alimentare.

La aceste aparate rezistenţa de măsurat R_x se conectează fie în serie (fig. 4.7, *a*) fie în paralel (fig. 4.7, *b*) cu una dintre bobinele mobile ale logometrului. Ca urmare, curentul prin una dintre bobinele mobile ale logometrului depinde de valoarea rezistenţei de măsurat, curentul prin cealaltă bobină fiind independent de aceasta.

Deviaţia logometrului este determinată de raportul curenţilor prin cele două bobine. Ambii curenţi fiind proporţionali cu tensiunea sursei, raportul lor nu depinde de aceasta :

$$\alpha = f\left[\frac{I_1}{I_2}\right] = f\left[\frac{R_2 + R_x}{R_1 + R_0}\right] = f\,(R_x)$$

unde : R_1 şi R_2 sînt rezistenţele bobinelor mobile şi R_0 — o rezistenţă de protecţie.

Indicaţiile megohmmetrului cu logometru sînt deci funcţie numai de rezistenţa de măsurat, fiind independente de tensiunea sursei, adică de viteza de rotaţie a manivelei inductorului. Ca urmare, aceste megohmmetre nu necesită nici o reglare prealabilă măsurării.

Megohmmetrele cu montaj paralel se folosesc pentru măsurarea rezistenţelor mici (0,02 — 0,2 MΩ), iar cele cu montaj serie, pentru măsurarea rezistenţelor mari (pînă la 500—1000 MΩ).

REZUMAT

● **Metode de măsurare a rezistenţelor :**

Metode de punte :

— puntea Wheatstone ;
— puntea dublă Thomson.

Metode industriale :

— metoda ampermetrului şi voltmetrului ;
— metode de comparaţie ;
— cu aparate indicatoare : ohmetre şi megohmmetre.

ÎNTREBĂRI DE CONTROL

1. Care este principiul metodelor de punte şi care sînt principalele lor caracteristici ?
2. Care este schema punţii Wheatstone şi care este modul de echilibrare a acesteia ?
3. Care sînt principiul şi montajele metodei ampermetrului şi voltmetrului ? Care este cauza erorii sistematice a acestei metode şi care montaje trebuie utilizate în funcţie de mărimea rezistenţei de măsurat, dacă nu se cunosc caracteristicile ampermetrului şi voltmetrului ?
4. Care sînt metodele de comparaţie pentru măsurarea rezistenţelor ? Schemele de principiu şi diferenţa dintre metode.
5. Care sînt aparatele indicatoare cu care se pot măsura rezistenţele ? Care este schema lor de principiu şi care sînt principalele tipuri constructive (cu descrierea funcţionării lor) ?

CAPITOLUL V

Măsurarea puterii și energiei electrice

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 înmulțindu-se indicația I a unui ampermetru montat în serie în circuit, cu indicația U a unui voltmetru montat în derivație, adică $P_m = U I$. Schema se poate realiza fie în montaj aval (fig. 5.1, *a*), fie în montaj amonte (fig. 5.1, *b*).

Din cauza consumului propriu al celor două aparate de măsurat, ambele montaje dau o eroare sistematică de metodă. De aceea, pentru determinarea puterii efective P consumată în receptor trebuie să se corecteze puterea măsurată P_m dată de produsul indicațiilor ampermetrului și voltmetrului, scăzîndu-se din ea puterea consumată de voltmetru $\left(p_V = U I_V = \frac{U^2}{R_V}\right)$, în *montajul aval*:

$$P = U I_R = P_m - p_V = U I - \frac{U^2}{R_V}$$

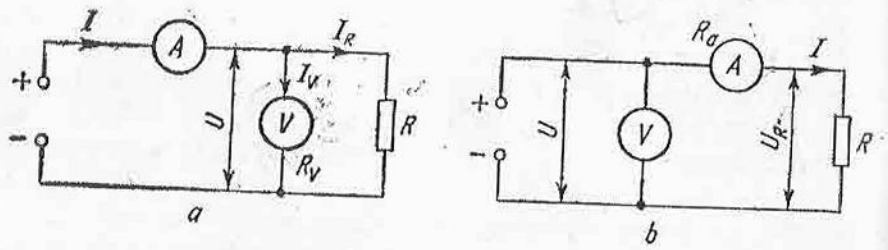


Fig. 5.1. Măsurarea puterii cu ampermetrul și voltmetrul.

sau de ampermetru ($p_A = R_A I^2$) în *montajul amonte*:

$$P = U_R I = P_m - p_A = UI - R_A I^2,$$

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 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.

2. Măsurarea puterii active cu wattmetrul în circuitele de curent continuu și de curent alternativ monofazat

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).

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. Spre deosebire de ampermetrele și voltmetrele electrodinamice, bobinele dispozitivului de măsurat nu se leagă între ele, ci formează circuite independente (fig. 5.2); *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:

$$I_1 = I \text{ și } I_2 = \frac{U}{Z_2} \approx \frac{U}{R_2},$$

unde $Z_2 \approx R_2$ 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 :*

$$\alpha = kI_1 I_2 = kI \frac{U}{R_2} = KP,$$

iar pentru circuitele de curent alternativ :

$$\alpha = kI_1 I_2 \cos(\widehat{I_1 I_2}) = kI \frac{U}{R_2} \cos(\widehat{I \frac{U}{R_2}}) = \frac{k}{R_2} IU \cos\varphi = KP\cos\varphi$$

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 dintre 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 atît 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.

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.

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 :

$$C = \frac{I_n U_n \cos\varphi}{\text{nr. diviz.}} = \frac{5 \cdot 150 \cdot 1}{150} = 5 \text{ W/div.}$$

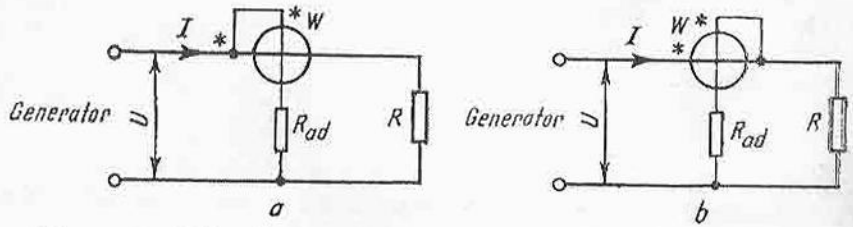


Fig. 5.2. Schemele de conectare a wattmetrului electrodinamic.

După modul de legare a bobinei de tensiune față de cea de curent, *schemele de conectare ale wattmetrului pot fi în montaj amonte* (fig. 5.2, *a*) *sau în montaj aval* (fig. 5.2, *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 încircuit 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.

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. 5.3, *a* și *b*) și respectiv *indirecte* (fig. 5.3, *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.

$$P_m = K_{in} K_{un} P_w.$$

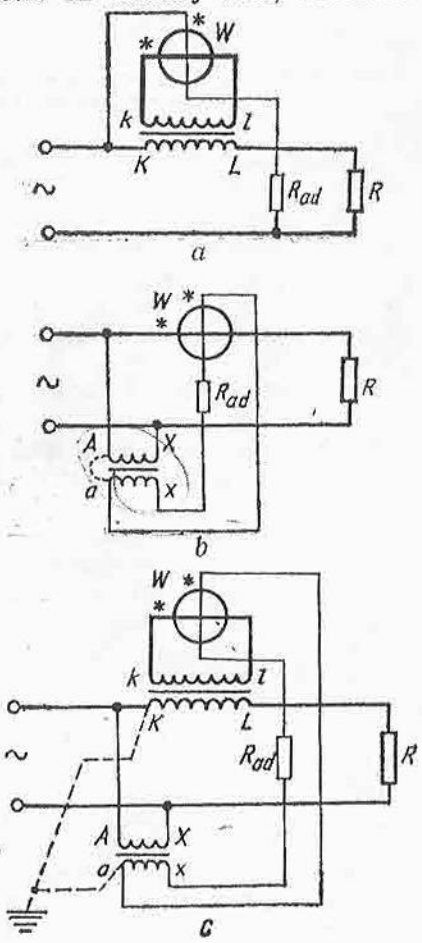


Fig. 5.3. Schemele de măsurare a puterii cu wattmetrul prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

3. Măsurarea puterii active în circuite trifazate

● **Măsurarea puterii active în circuite trifazate fără conductor neutru.**

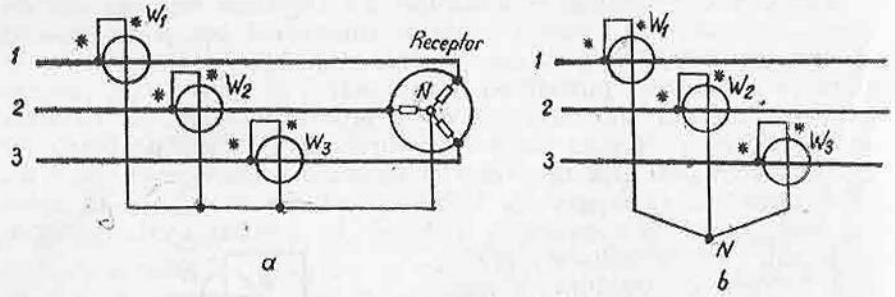


Fig. 5.4. **Măsurarea puterii active cu trei wattmetre în circuite trifazate fără conductor neutru, nesimetrice și dezechilibrate.**

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 :

$$P = U_{10} I_1 \cos \varphi_1 + U_{20} I_2 \cos \varphi_2 + U_{30} I_3 \cos \varphi_3,$$

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 defazajele 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. 5.4, *a*). Dacă punctul neutru al sarcinii nu este accesibil, bobinele de tensiune se pot conecta la un punct neutru comun N (fig. 5.4, *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 dintre 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 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. 5.5), cărora le corespund următoarele expresii ale puterii active trifazate :

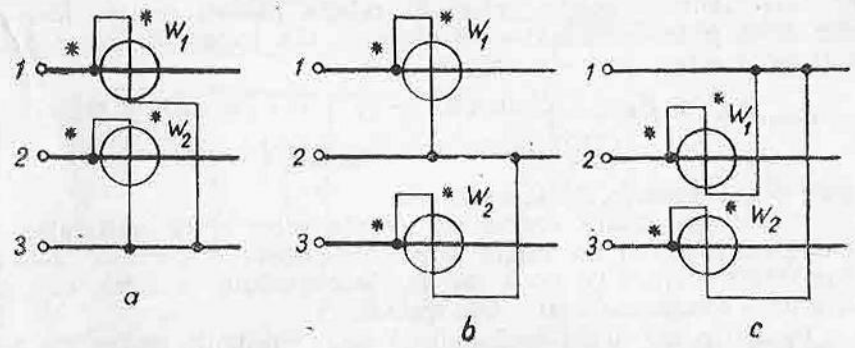


Fig. 5.5. **Măsurarea puterii active cu două wattmetre în circuite trifazate fără conductor neutru, nesimetrice și dezechilibrate.**

— faza *3* de referință (fig. 5.5, *a*) :

$$P = U_{13} I_1 \cos (\widehat{U_{13} I_1}) + U_{23} I_2 \cos (\widehat{U_{23} I_2}) = P_1 + P_2 ;$$

— faza *2* de referință (fig. 5.5, *b*) :

$$P = U_{12} I_1 \cos (\widehat{U_{12} I_1}) + U_{32} I_3 \cos (\widehat{U_{32} I_3}) = P_1 + P_3 ;$$

— faza *1* de referință (fig. 5.5, *c*) :

$$P = U_{21} I_2 \cos (\widehat{U_{21} I_2}) + U_{31} I_3 \cos (\widehat{U_{31} I_3}) = P_2 + P_3.$$

În funcție de caracterul sarcinii, unul dintre 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 :

$$P = P_1 + (- P_2) = P_1 - P_2.$$

În cazul particular al circuitelor trifazate cu tensiuni simetrice și curenți echilibrați, cînd tensiunile, curenții și defazajele sînt egale între ele :

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U ; \quad I_1 = I_2 = I_3 = I \quad \text{și} \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

unghiurile dintre tensiunile aplicate bobinelor de tensiune și curenții prin bobinele de curent sînt :

$$\widehat{U_{13} I_1} = 30° - \varphi, \qquad \text{și} \qquad \widehat{U_{23} I_2} = 30° + \varphi.$$

Înlocuindu-se aceste valori în relaţia puterii pentru faza 3, rezultă că puterea P măsurată obţinută din indicaţiile celor două wattmetre este :

$$P = P_1 + P_2 = UI \cos (30° - \varphi) + UI \cos (30° + \varphi) =$$

$$= UI\,2 \cos 30° \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi,$$

adică tocmai puterea totală trifazată.

Măsurarea puterii active cu schema celor două wattmetre se poate realiza şi 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 wattmetrice monofazate, montate conform schemei celor două wattmetre. Wattmetrele electrodinamice trifazate au bobinele mobile ale celor două dispozitive de măsurat fixate pe acelaşi ax, astfel încît cuplurile lor active se însumează.

În cazul circuitelor trifazate cu tensiuni simetrice şi curenţi echilibraţi, tensiunile, curenţii şi defazajele dintre ele fiind aceleaşi pe fiecare fază, puterile pe cele trei faze sînt egale şi astfel puterea activă se poate măsura cu un singur wattmetru. Acesta se montează cu bobina de curent pe una din faze şi cu bobina de tensiune între faza respectivă şi punctul neutru al sarcinii. Punctul neutru fiind accesibil numai în cazul sarcinilor simetrice legate în stea (fig. 5.6, *a*), de obicei este creat în mod artificial cu ajutorul a două rezistenţe adiţionale R_2 şi R_3 egale cu rezistenţa totală a circuitului de tensiune a wattmetrului (fig. 5.6, *b*). Valoarea puterii active trifazate P se obţine înmulţind cu trei indicaţia P_w a wattmetrului ($P = 3P_w$). Dacă wattmetrul monofazat este destinat să funcţioneze permanent în circuite trifazate echilibrate, scara sa se gradează astfel încît să indice direct puterea activă trifazată.

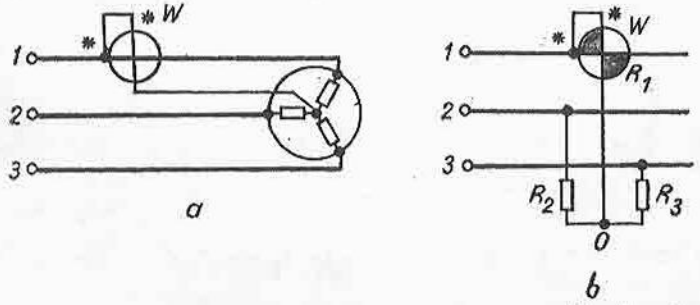


Fig. 5.6. **Măsurarea puterii active cu un singur wattmetru în circuite trifazate simetrice şi echilibrate.**

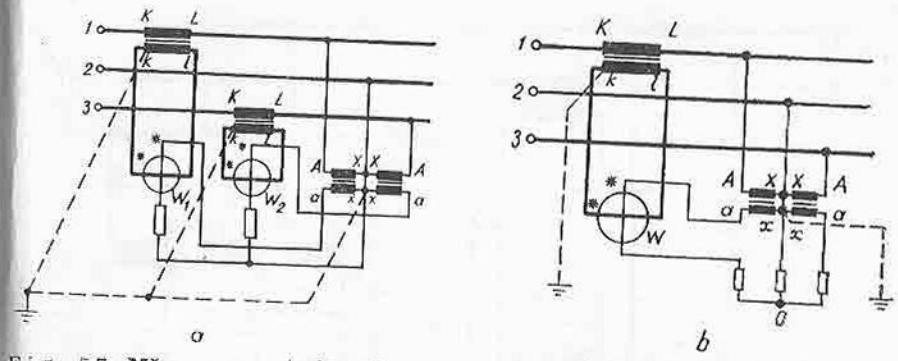


Fig. 5.7. **Măsurarea puterii active în circuite trifazate fără conductor neutru, prin intermediul transformatoarelor de măsurat :**

a — cu două wattmetre, în circuite nesimetrice ;
b — cu un wattmetru, în circuite simetrice şi echilibrate.

În circuitele trifazate în care tensiunile şi curenţii depăşesc valorile nominale ale wattmetrelor, măsurarea puterii se efectuează prin intermediul transformatoarelor de măsurat, în montaj semiindirect sau indirect (fig. 5.7). În scopul protecţiei circuitelor de măsurare faţă de pericolul pătrunderii accidentale a tensiunii înalte, înfăşurările secundare ale transformatoarelor de curent, împreună cu punctul comun al transformatoarelor de tensiune sînt legate la pămînt ; în felul acesta diferenţa 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 şi curenţi dezechilibraţi şi necesită numai două aparate de măsurat. Schema cu trei wattmetre se foloseşte rar, numai la măsurarea puterilor mici, cînd este necesară menţinerea simetriei circuitului trifazat (de exemplu încercarea motoarelor de mică putere).

● **Măsurarea puterii active în circuite 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 şi cu bobinele de tensiune legate la fazele respective şi la conductorul neutru care este*

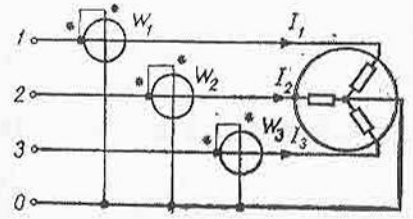


Fig. 5.8. **Măsurarea puterii active în circuite trifazate cu conductor neutru.**

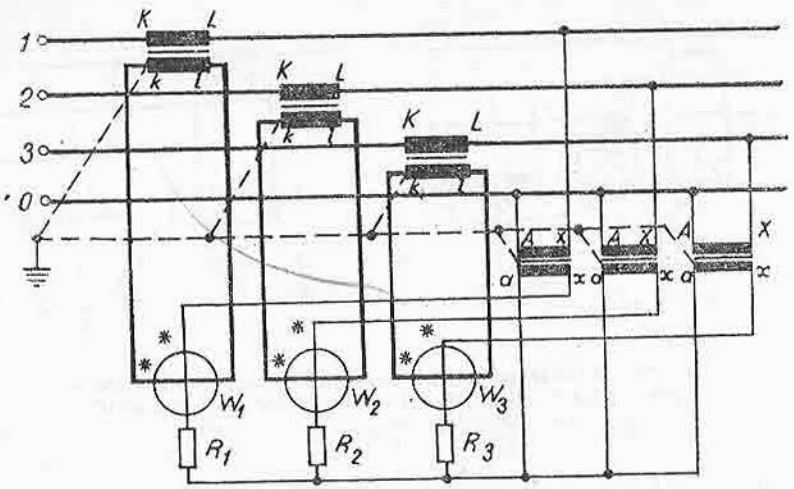


Fig. 5.9. **Măsurarea puterii active în circuite trifazate cu conductor neutru, prin intermediul transformatoarelor de măsurat.**

conductor de referință (fig. 5.8). Puterea totală trifazată este dată de suma indicațiilor celor trei wattmetre :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 =$$

$$= U_{10} I_1 \cos (\widehat{U_{10} I_1}) + U_{20} I_2 \cos (\widehat{U_{20} I_2}) + U_{30} I_3 \cos (\widehat{U_{30} I_3}).$$

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 5.9 este reprezentată schema de montaj indirect a wattmetrelor pentru măsurarea puterii prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

4. Măsurarea puterii active la frecvențe înalte

Măsurarea directă a puterii în circuitele de înaltă frecvență cu ajutorul wattmetrelor electrodinamice nu este posibilă deoarece acestea, ca orice aparat electrodinamic, nu pot fi utilizate la frecvențe care depășesc cîteva sute de herți. *La frecvențe înalte puterea se determină indirect prin măsurarea tensiunii sau curentului pe o rezistență de valoare cunoscută, iar la frecvențele foarte înalte prin metode care transformă energia electromagnetică în alte forme de energie măsurabilă* (luminoasă — metoda fotometrică, sau căldură — metoda calorimetrică).

● **Măsurarea puterii cu wattmetrul de ieșire.** În majoritatea cazurilor practice, în domeniul frecvențelor înalte puterea se măsoară la bornele unei sarcini fixe, care prezintă în general o impedanță cunoscută, deoarece generatoarele de frecvență și amplificatoarele lucrează pe o impedanță de ieșire fixă (de obicei o rezistență apropiată ca valoare de sarcina optimă). Ca urmare puterea se poate afla indirect din valoarea măsurată a tensiunii la bornele sarcinii (sau a unui rezistor prezentînd aceeași rezistență R ca și sarcina) sau a curentului care parcurge sarcina, cu relațiile :

$$P = R I^2 = \frac{U^2}{R}.$$

Rezistența R fiind fixă, voltmetrul sau ampermetrul poate fi etalonat direct în wați, obținîndu-se astfel un aparat care măsoară direct puterile, denumit *wattmetru de ieșire.*

În principiu, wattmetrul de ieșire este un aparat simplu care comportă un rezistor și un aparat de măsurat. Rezistorul trebuie să aibă un wattaj destul de mare pentru a absorbi puterea debitată de sursă. Aparatul de măsurat (voltmetru sau ampermetru) trebuind să măsoare valori efective într-un domeniu larg de frecvențe, este cuplat cu un redresor.

Sub această formă simplă, wattmetrul de ieșire are un domeniu de utilizare restrîns, deoarece posedînd o singură impedanță de intrare, fixă, nu poate fi folosit pentru oricе sarcină și prezentînd o singură sensibilitate nu poate măsura puteri de diferite niveluri.

Pentru a varia sensibilitatea wattmetrului se introduce între sursă și ansamblul rezistență-voltmetru, un atenuator în trepte (fig. 5.10, *a*) *sau se realizează rezistența de intrare dintr-un ansam-*

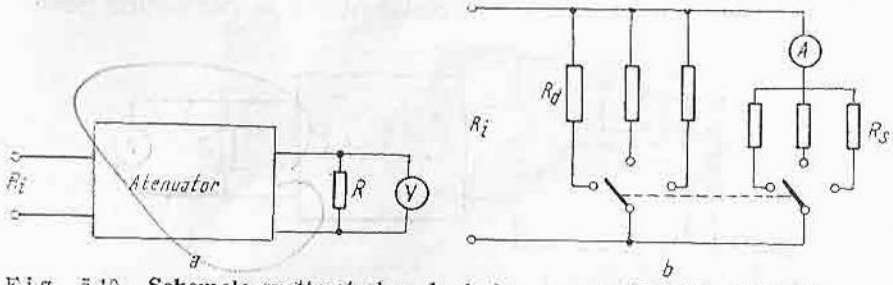


Fig. 5.10. **Schemele wattmetrelor de ieșire cu sensibilitate variabilă.**

blu de două rezistențe R_s *și* R_a *variabile* (fig. 5.10, *b*). În primul caz antenuatorul este astfel proiectat încît impedanța de intrare rămîne mereu aceeași. În al doilea caz cele două rezistențe R_s și R_a pot fi variate astfel încît rezistența de intrare rămîne constantă, curentul maxim care circulă prin aparat menținîndu-se la aceeași valoare (curentul nominal al aparatului).

Pentru a se obține și diferite impedanțe de intrare, wattmetrul de ieșire se prevede la intrare cu un transformator de adaptare sau cu un cuadripol rezistiv de adaptare.

Dispunîndu-se un transformator cu prize la intrarea wattmetrului (fig. 5.11) se poate varia atît sensibilitatea cît și impedanța de intrare prin variația raportului de transformare (variind prin aceasta impedanța la bornele de intrare ale circuitului său primar). Într-adevăr, dacă se notează cu Z_1 impedanța de intrare $\left(Z_1 = \frac{U_1}{I_1}\right)$, cu Z_2 — impedanța de sarcină $\left(Z_2 = \frac{U_2}{I_2}\right)$ și cu n — raportul de transformare $\left(n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}\right)$, se poate scrie (în cazul transformatorului ideal) :

$$Z_1 = \frac{1}{n^2} Z_2.$$

În acest caz se determină cu ușurință rezistența optimă de sarcină a sursei prin variația rezistenței de intrare a wattmetrului pînă cînd indicația sa este maximă, ceea ce corespunde egalității celor două rezistențe.

Utilizarea cuadripolilor rezistivi de adaptare în locul transformatoarelor (fig. 5.12) prezintă avantajul că avînd numai elemente liniare (rezistențe) permite folosirea wattmetrului de ieșire într-o bandă largă de frecvențe.

În figura 5.12, *a* este prezentat un cuadripol format din două rezistențe R_1 și R_2 prin a căror alegere convenabilă se poate modifica rezistența de intrare pentru orice valoare. În figura 5.12, *b* este prezentat un cuadripol în π cu care, la fel ca în cazul precedent, prin alegerea convenabilă a rezistențelor se pot obține pentru

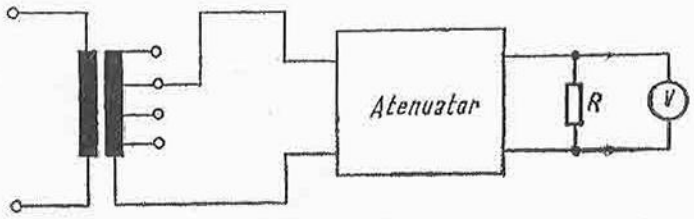


Fig. 5.11. **Wattmetru de ieșire cu transformator cu priză la intrare.**

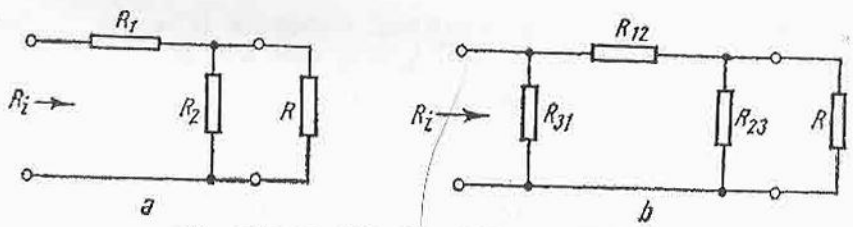


Fig. 5.12. **Cuadripoli rezistivi de adaptare.**

impedanța de intrare și atenuarea introdusă valorile dorite. În felul acesta prin utilizarea unei serii de cuadripoli se realizează un wattmetru de ieșire cu mai multe impedanțe de intrare. Dacă înaintea aparatului de măsurat se introduce în serie un atenuator în trepte, poate fi variată și sensibilitatea wattmetrului.

● **Măsurarea puterii cu wattmetrul cu redresoare.** *Pe același principiu al măsurării indirecte a puterii este construit și wattmetrul cu redresoare, care folosește drept cuadripol traductor redresoare semiconductoare sau tuburi electronice.* În figura 5.13 este prezentată schema unui wattmetru cu diode redresoare. În serie cu rezistența de sarcină Z_s se conectează două rezistențe identice R_a de valoare mult mai mică decît Z_s, iar în paralel — o rezistență R_v de valoare mult mai mare decît Z_s. În aceste condiții se poate considera că curentul care trece prin rezistențele R_a este egal cu curentul i prin sarcină, iar căderea de tensiune u_v de pe o parte a rezistenței R_v este proporțională cu $u_s = u$ și în fază cu aceasta ($u_v = k_v u$). În circuitul diodei D_1 se aplică astfel tensiunea $u_1 = u_a + u_v$, iar în circuitul diodei D_2 — tensiunea $u_2 = u_a - u_v$, unde $u_a = R_a i$. Dacă diodele D_1 și D_2 sînt

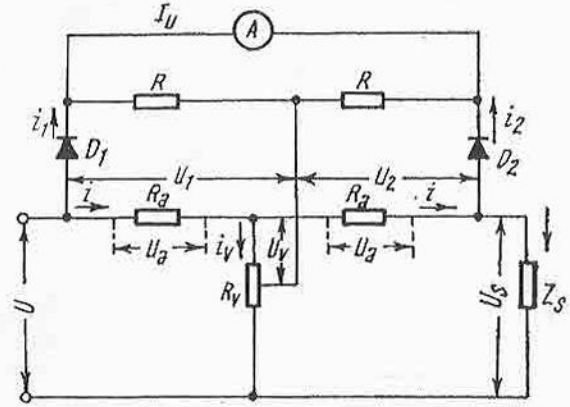


Fig. 5.13. **Schema wattmetrului cu redresoare.**

identice, avînd aceeaşi caracteristică voltamper ($i = au + bu^2$), atunci se pot determina curenţii i_1 şi i_2 care trec prin ele :

$$i_1 = a\,(u_a + u_v) + b\,(u_a + u_v)^2$$

$$i_2 = a\,(u_a - u_v) + b\,(u_a - u_v)^2,$$

de unde :

$$i_0 = i_1 - i_2 = 2a\,u_v + 4b\,u_a\,u_v = 2a\,k_v\,u + 4b\,k_v\,R_a\,ui =$$

$$= 4b\,k_v\,R_a\,U\,I\,\cos\varphi + 2a\,k_v\,U_m \sin\omega t - 2b\,k_v\,R_a\,U_m\,I_m \cos(\omega t - \varphi),$$

înlocuind valorile instantanee ale lui u şi i cu expresiile lor :

$$u = U_m \sin\omega t \quad \text{şi} \quad i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Aparatul magnetoelectric A măsoară componenta continuă :

$$I_0 = 4b\,k_v\,R_a\,U\,I\,\cos\varphi = KP$$

unde $K = 4b\,k_v\,R_a$ este un coeficient de proporţionalitate ;

$P = UI\cos\varphi$ — valoarea medie a puterii absorbită de sarcină.

Ca urmare, scara aparatului de măsurat se poate grada direct în waţi.

Cu acest wattmetru se poate măsura puterea pînă la o frecvenţă de 100 kHz, cu o precizie destul de bună (5—10%).

● **Măsurarea puterii cu wattmetrul cu termocupluri.** *Pentru frecvenţe mai mari, pînă la 1 MHz, puterea se poate măsura cu wattmetrul cu termocupluri.* Schema acestuia (fig. 5.14) este asemănătoare cu cea a wattmetrului cu redresoare, în care diodele au fost înlocuite cu două termocupluri identice T_1 şi T_2, a căror diferenţă de tensiune termoelectromotoare se măsoară cu milivoltmetrul magnetoelectric. Rezistenţa schemei wattmetrului este astfel aleasă încît curenţii i_1 şi i_2 sînt foarte mici în comparaţie cu curenţii i şi i_v iar curentul i_v este foarte mic în comparaţie cu curentul i care trece prin sarcină. În aceste condiţii există relaţiile :

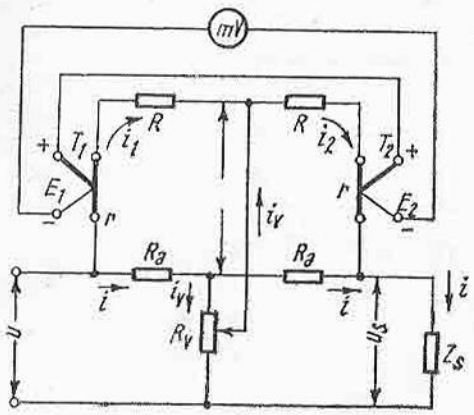


Fig. 5.14. **Schema wattmetrului cu termocupluri.**

$$u_v = k_v\,u\,;$$

$$i_1 = \frac{1}{R+r}\,(R_a\,i + k_v\,u)\,;$$

$$i_2 = \frac{1}{R+r}\,(R_a\,i - k_v\,u),$$

unde r este rezistenţa firului încălzitor al termocuplului.

Tensiunile termoelectromotoare E_1 şi E_2 sînt proporţionale cu pătratul valorilor eficace ale curenţilor i_1 şi i_2 :

$$E_1 = \frac{K}{R+r}\,\frac{1}{T}\int_0^T (R_a\,i + k_v\,u)^2\,dt\,;$$

$$E_2 = \frac{K}{R+r}\,\frac{1}{T}\int_0^T (R_a\,i - k_v\,u)^2\,dt,$$

de unde

$$E_1 - E_2 = \frac{4K\,k_v\,R_a}{R+r}\,\frac{1}{T}\int_0^T ui\,dt = K_1\,P,$$

unde K şi $K_1 = \dfrac{4K\,k_v\,R_a}{R+r}$ sînt coeficienţi de proporţionalitate, iar

$P = \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T ui\,dt$ — valoarea medie a puterii absorbită de sarcină.

Deci milivoltmetrul măsoară o diferenţă de tensiune proporţională cu valoarea medie a puterii absorbită de sarcină şi astfel poate fi gradat direct în waţi.

● **Măsurarea puterii cu osciloscopul catodic.** Energia consumată în timpul unei perioade a curentului alternativ este

$$W = \int_0^T ui\,dt = \int_0^T u\,dq,$$

unde $dq = idt$ este sarcina electrică.

Suprafaţa cuprinsă de curba dată de funcţia $u = f(q)$ este egală cu energia absorbită de circuit într-o perioadă T. Puterea fiind proporţională cu energia $P = \dfrac{W}{T}$, înseamnă că este proporţională şi cu suprafaţa cuprinsă de curbă. Ca urmare prin reprezentarea curbei $u = f(q)$ pe ecranul osciloscopului catodic se poate măsura puterea.

Pentru aceasta se aplică pe una din perechile plăcilor de deflexie tensiunea u de la bornele sarcinii (fig. 5.15), iar pe cealaltă pereche — o tensiune u_1 de la bornele unei rezistenţe R_A în serie cu sarcina (proporţională cu curentul i prin sarcină $u_1 = R_A\,i$)

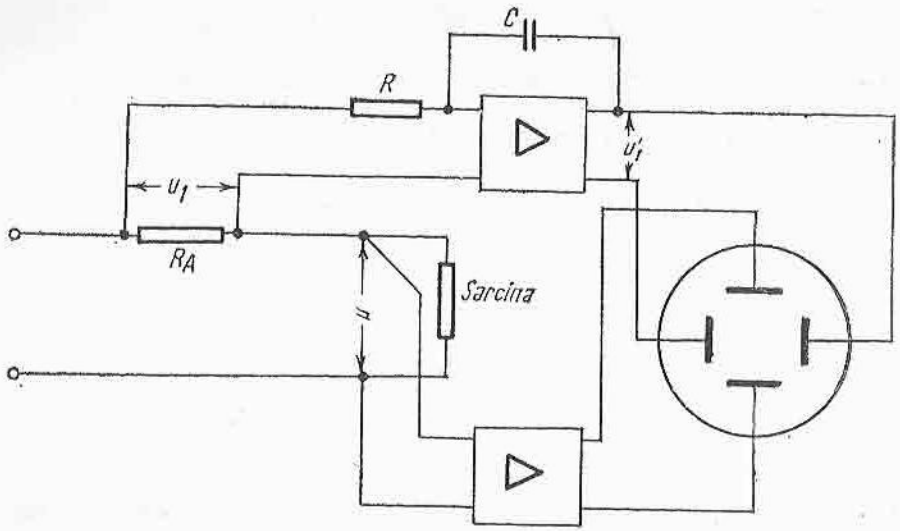


Fig. 5.15. **Măsurarea puterii cu osciloscopul catodic.**

prin intermediul unui traductor RC care dă integrala unei mărimi electrice :

$$u_1' = -\frac{1}{RC}\int u_1\,dt = -\frac{R_A}{RC}\,q.$$

În acest mod spotul osciloscopului descrie pe ecran curba $u = f(q)$, care poate fi fotografiată sau relevată pe o hîrtie milimetrică transparentă și apoi suprafața cuprinsă de curbă să fie măsurată în funcție de scările deviațiilor orizontale și verticale.

● **Măsurarea puterii prin metoda fotometrică.** Metoda fotometrică este o meodă de substituție. În figura 5—16 este prezentată schema de principiu a metodei. Puterea de măsurat încălzește filamentul unei lămpi electrice *L*, care devine incandescent. În același timp, întrerupătorul *M* este deschis. Cu ajutorul unei fotocelule *F* se determină fluxul luminos emis sub un anumit unghi solid, ceea ce determină citirea unei tensiuni U_0 la voltmetrul *V*. Dacă se înlocuiește sursa de putere de frecvență radio printr-o sursă de joasă frecvență cunoscută sau de curent continuu de la o baterie *E* (întrerupătorul *M* fiind închis), se reglează rezistența *R* pînă cînd voltmetrul *V* indică aceeași valoare U_0. Această înseamnă că cele două surse debitează puteri egale. Cunoscîndu-se puterea de joasă frecvență sau de curent continuu, se cunoaște implicit puterea de frecvență radio.

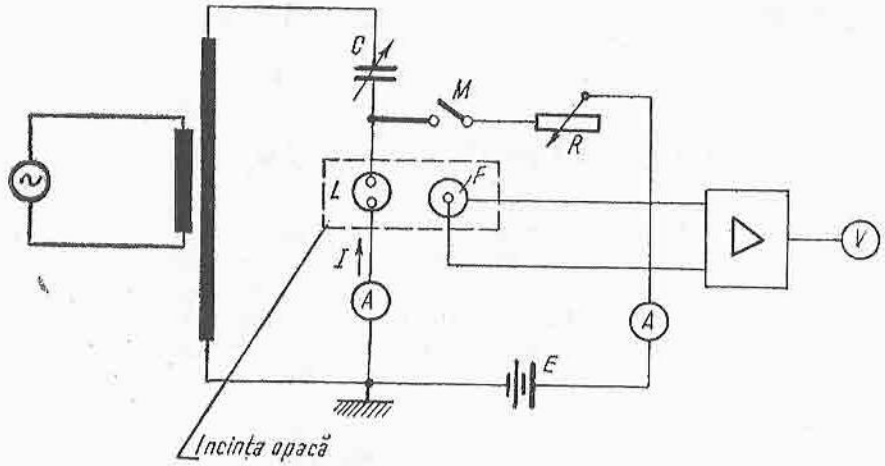


Fig. 5.16. **Măsurarea puterii prin metoda fotometrică.**

Metoda fiind de substituție, erori nu intervin decît din cauză că, eventual, rezistența filamentului variază odată cu frecvența, obținîndu-se în acest caz valori diferite ale puterii în joasă frecvență și în frecvență radio. Experiența arată însă că, chiar dacă se utilizează becuri obișnuite auto pentru măsurarea puterilor de aproximativ 5 W, la frecvențe pînă la 5 MHz, erorile comise rămîn, în general, mai mici de 10%.

B. Măsurarea puterii reactive

Măsurarea puterii reactive se poate face prin două metode : *indirectă și directă*, întrebuințîndu-se ca aparate de măsurat wattmetre sau varmetre.

1. Măsurarea indirectă a puterii reactive

Principiul metodei constă în a se deduce prin calcul puterea reactivă *Q* din relația :

$$\boxed{Q = \sqrt{S^2 - P^2}}$$

Puterea activă *P* se măsoară cu wattmetrul, iar puterea $S = UI$ se calculează din indicațiile unui voltmetru și a unui ampermetru.

În general metoda indirectă de măsurare a puterii reactive nu dă rezultate precise din cauza numărului mare de aparate întrebuințate și a consumului acestora.

2. Măsurarea directă a puterii reactive cu wattmetrul

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°— φ, indicația P_w a wattmetrului:

$$P_w = U'I \cos(90° - \varphi) = U'I \sin\varphi = \frac{U'}{U} UI \sin\varphi = \frac{U'}{U} Q$$

este proporțională tocmai cu puterea reactivă Q. Valoarea acesteia în funcție de indicația wattmetrului va fi deci:

$$\boxed{Q = \frac{U}{U'} P_w}$$

În practică, găsirea unei astfel de tensiuni auxiliare este dificilă. Din această cauză metoda nu se folosește decît 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 două faze sînt defazate cu 90°, în urma tensiunii de pe a treia fază. Astfel tensiunea între faze U_{23} este defazată cu 90° în urma tensiunii pe fază U_{10}, tensiunea U_{31} față de U_{20} și tensiunea U_{12} față de U_{30} (fig. 5.17, *b*).

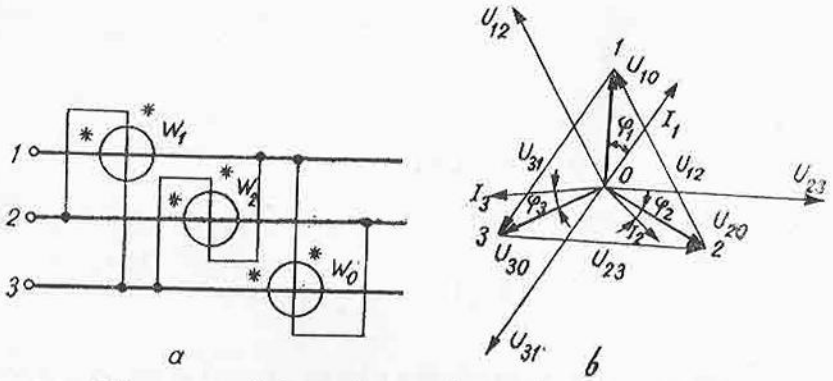


Fig. 5.17. **Măsurarea puterii reactive cu trei wattmetre în circuite trifazate simetrice și dezechilibrate.**

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. 5.17, *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:

$$Q = U_{10} I_1 \sin(\widehat{U_{10} I_1}) + U_{20} I_2 \sin(\widehat{U_{20} I_2}) + U_{30} I_3 \sin(\widehat{U_{30} I})_3 =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} [U_{23} I_1 \cos(\widehat{U_{23} I_1}) + U_{31} I_2 \cos(\widehat{U_{31} I_2}) + U_{12} I_3 \cos(\widehat{U_{12} I_3})] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}),$$

unde P_{w1}, P_{w2} și P_{w3} sînt indicațiile celor trei wattmetre.

În circuite trifazate simetrice și dezechilibrate puterea reactivă se poate măsura și numai cu două wattmetre, la fel ca puterea activă. Luînd faza a treia ca fază de referință, expresia puterii reactive trifazate este analogă cu cea a puterii active:

$$Q = U_{13} I_1 \sin(\widehat{U_{13} I_1}) + U_{23} I_2 \sin(\widehat{U_{23} I_2}).$$

Tensiunile auxiliare defazate cu 90° în urma tensiunilor U_{12} și U_{23} sînt U_{20} și respectiv — U_{10} (fig. 5.18, *b*); raportul dintre aceste tensiuni este $\frac{U}{U'} = \sqrt{3}$. Aplicînd bobinelor de tensiune ale celor două wattmetre tensiunile U_{20} și $-U_{10}$ (fig. 5.18, *a*), puterea reactivă trifazată obținută din indicațiile P_{w1} și P_{w2} ale wattmetrelor este:

$$Q = \sqrt{3} [U_{20} I_1 \cos(\widehat{U_{20} I_1}) + U_{10} I_2 \cos(-\widehat{U_{10} I_2})] = \sqrt{3} (P_{w1} + P_{w2}).$$

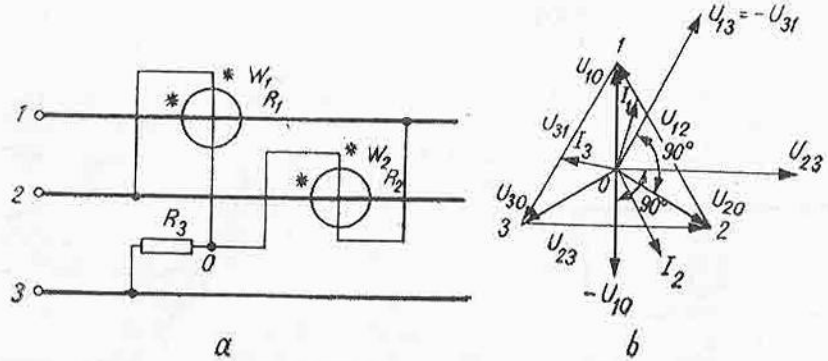


Fig. 5.18. **Măsurarea puterii reactive cu două wattmetre în circuite trifazate simetrice și dezechilibrate.**

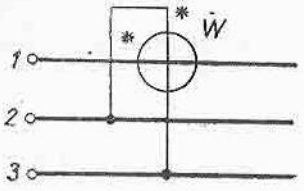


Fig. 5.19. **Măsurarea puterii reactive cu un wattmetru în circuite trifazate simetrice și echilibrate.**

Pentru a se putea aplica bobinelor de tensiune ale wattmetrelor tensiunile pe fază U_{20} și $-U_{10}$, se creează un punct neutru artificial 0 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. 5.19). 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 varmetrul electrodinamic

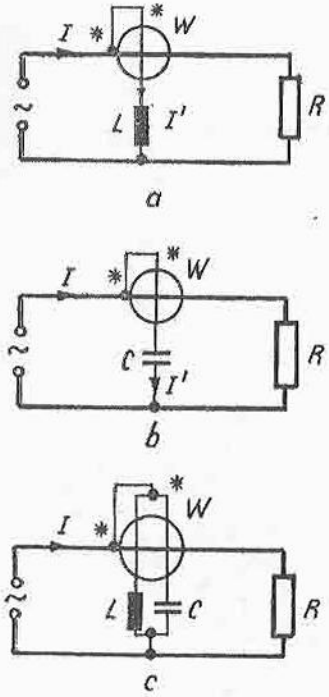


Fig. 5.20. **Schema varmetrelor electrodinamice.**

Varmetrele electrodinamice sînt aparate speciale care permit măsurarea directă a puterii reactive. Construcția lor este asemănătoare cu cea a wattmetrelor obișnuite de putere activă, cu deosebirea că bobina de tensiune se montează în serie cu o inductanță L foarte mare (fig. 5.20, *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 $90° - \varphi$). În aceste condiții, avînd $I' = \frac{U}{L\omega}$ și $\cos(\widehat{I\ I'}) = \cos(90° - \varphi) = \sin\varphi$, ecuația scării wattmetrului electrodinamic devine :

$$\alpha = K I I' \cos(\widehat{I\ I'}) = \frac{K}{L\omega} IU \sin\varphi = \frac{K}{L\omega} Q,$$

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. 5.20, *b*), în care caz avînd $I' = C\omega U$ se obține :

$$\alpha = K C\omega I U \sin\varphi = K C\omega Q.$$

Pentru a se micșora influența frecvenței asupra indicațiilor se construiesc 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. 5.20, *c*). Ecuația scării în acest caz are expresia :

$$\alpha = K\left[\frac{1}{L\omega} + C\omega\right] Q.$$

Pentru o anumită valoare a lui L și C, pentru care este îndeplinită condiția $L C\omega_0^2 = 1$, în care ω_0 este frecvența pentru care este construit aparatul, indicațiile varmetrelor sînt foarte puțin influențate de variația frecvenței.

Puterea reactivă se măsoară cu ajutorul varmetrelor prin aceleași metode ca și puterea activă cu ajutorul wattmetrelor, montajele fiind absolut identice.

Varmetrul indică în sensul normal dacă defazajul dintre U și I este inductiv și în sens contrar dacă defazajul este capacitiv.

C. Măsurarea energiei electrice active

Energia electrică fiind, prin definiție, integrala puterii electrice consumate de un receptor într-un interval de timp, $W = \int_{t_1}^{t_2} P\,dt$, *aparatele pentru măsurarea energiei sînt aparate integratoare, compuse dintr-un dispozitiv wattmetric de măsurare a puterii și un mecanism integrator.* Astfel de aparate sînt contoarele. Cele mai utilizate sînt contoarele electrodinamice și de inducție.

1. Măsurarea energiei electrice în circuitele de curent continuu

În circuitele de curent continuu energia electrică se măsoară în general cu contoare de tip electrodinamic.

● **Contorul electrodinamic.** Principiul de funcționare al acestui aparat este asemănător celui al wattmetrului electrodinamic.

Contorul electrodinamic (fig. 5.21) 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.

Bobina mobilă este alimentată cu curent prin intermediul unui colector *3*, pe care calcă două perii de argint *4*, cu frecări foarte reduse. Pe axul *5* al bobinei mobile mai este fixat un disc ușor de aluminiu *6*, care se rotește între polii unui magnet permanent *7*.

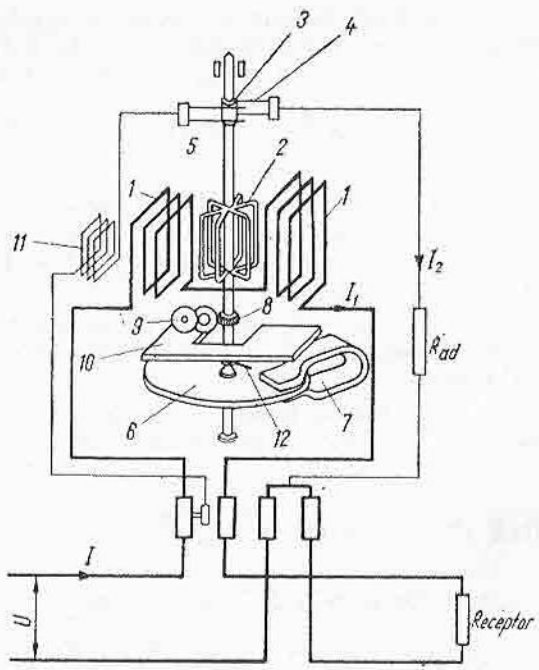


Fig. 5.21. **Contorul electrodinamic.**

Aparatul este lipsit de arcuri spirale antagoniste, astfel că discul se poate roti continuu în același sens. Contorul este lipsit de asemenea de ac indicator și scară gradată, în locul acestora fiind prevăzut cu un mecanism integrator *9* al numărului de rotații executat de echipajul mobil, care este angrenat de axul acestuia prin intermediul unei transmisii cu melc *8*.

Contorul se conectează în circuitul de măsurare la fel ca wattmetrul, cu bobina de curent în serie (fiind astfel parcursă de curentul I din receptor) și bobina de tensiune (legată în serie cu o rezistență adițională R_{ad} și o altă bobină de compensare *11*) în paralel (fiind alimentată de tensiunea U de la bornele receptorului). Astfel cuplul activ al dispozitivului de măsurat este proporțional cu puterea P consumată de receptor ;

$$M_a = k I_1 I_2 = kI \frac{U}{R} = \frac{k}{R} I U = KP.$$

Sub acțiunea acestui cuplu echipajul mobil se pune în mișcare. Discul de aluminiu rotindu-se în întrefierul magnetului permanent, se induc 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 :

$$M_f = k_1 \Phi_m I_m = k_1 \Phi_m k_2 \Phi_m n = k_3 \Phi_m^2 n = k n.$$

Dacă se neglijează frecarea în lagăre, cînd cuplul activ și cuplul de frînare devin egale ($M_a = M_f$), echipajul mobil se rotește cu o viteză de regim uniformă. Această viteză, așa cum rezultă din egalitatea expresiilor celor două cupluri M_a și M_f este proporțională cu puterea consumată de receptor :

$$P = \frac{k}{K} n = C n.$$

Ca urmare, energia consumată de receptor într-un interval de timp t este proporțională cu numărul de rotații N efectuate de disc în acest timp :

$$W = C n t = C N.$$

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 *constanta nominală a contorului* și reprezintă numărul de rotații ale sistemului corespunzător unității de energie consumată.

Din expresia energiei W 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.

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.

● **Contorul de inducție monofazat.** Contorul de inducție (fig. 5.22) este un dispozitiv de măsurat de inducție cu cîmp de fugă și trei fluxuri, de tip tangențial. Electromagnetul *1*, 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 cîmp, interacționînd cu curenții turbionari induși în discul *4*, creează cuplul de frînare.

Cuplul activ al contorului este proporțional cu putea P consumată de receptor :

$$M_a = K\,\Phi_1\,\Phi_U'\,\sin\,(\widehat{\Phi_I\,\Phi_U}) = K'\,I\,U\,\sin\,(90^\circ - \varphi) = K'\,I\,U\,\cos\,\varphi = K'\,P.$$

Cuplul de frînare M_f creat la fel ca la contorul electrodinamic, are expresia analogă cu a cuplului acestuia :

$$M_f = k_1\,\Phi_m\,I_m = k_1'\,\Phi_m^2\,n = k\,n.$$

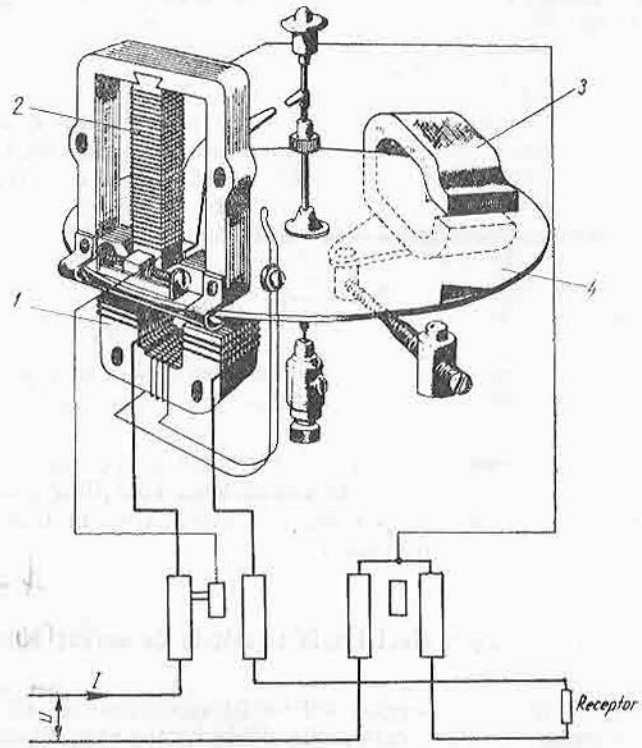
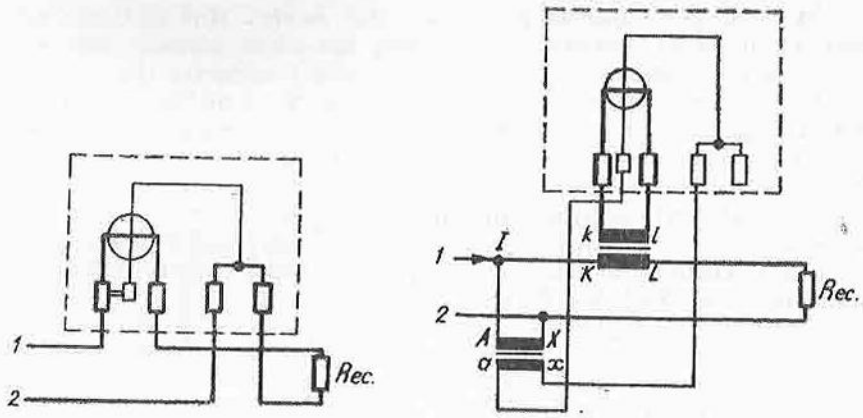


Fig. 5.22. **Contorul de inducție monofazat.**



a *b*

Fig. 5.23. **Schemele de conectare în circuit a contorului monofazat de curent alternativ.**

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 :

$$W = Cnt = CN$$

În figura 5.23, *a* este prezentată schema conectării în circuit a contorului monofazat. 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. 5.23, *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, respectiv trei wattmetre la măsurarea puterii active, energia totală obținîndu-se prin însumarea energiilor înregistrate de fiecare contor separat.

Contoarele trifazate reunesc într-un același aparat două sau trei dispozitive de măsurat monofazate (comportînd fiecare cîte un electromagnet de curent și unul de tensiune) ale căror cupluri active acționează asupra aceluiași ax, astfel încît 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,* ale căror sisteme active se montează în circuit după schema celor două wattmetre (fig. 5.24, *a*).

În circuitele trifazate cu conductor neutru se utilizează *contoare cu trei dispozitive de măsurat,* montate după schema celor trei wattmetre (fig. 5.25, *a*) și care acționează asupra a trei sau două discuri fixate pe același ax.

În cazul cînd 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. 5.24, *b* și 5.25, *b*).

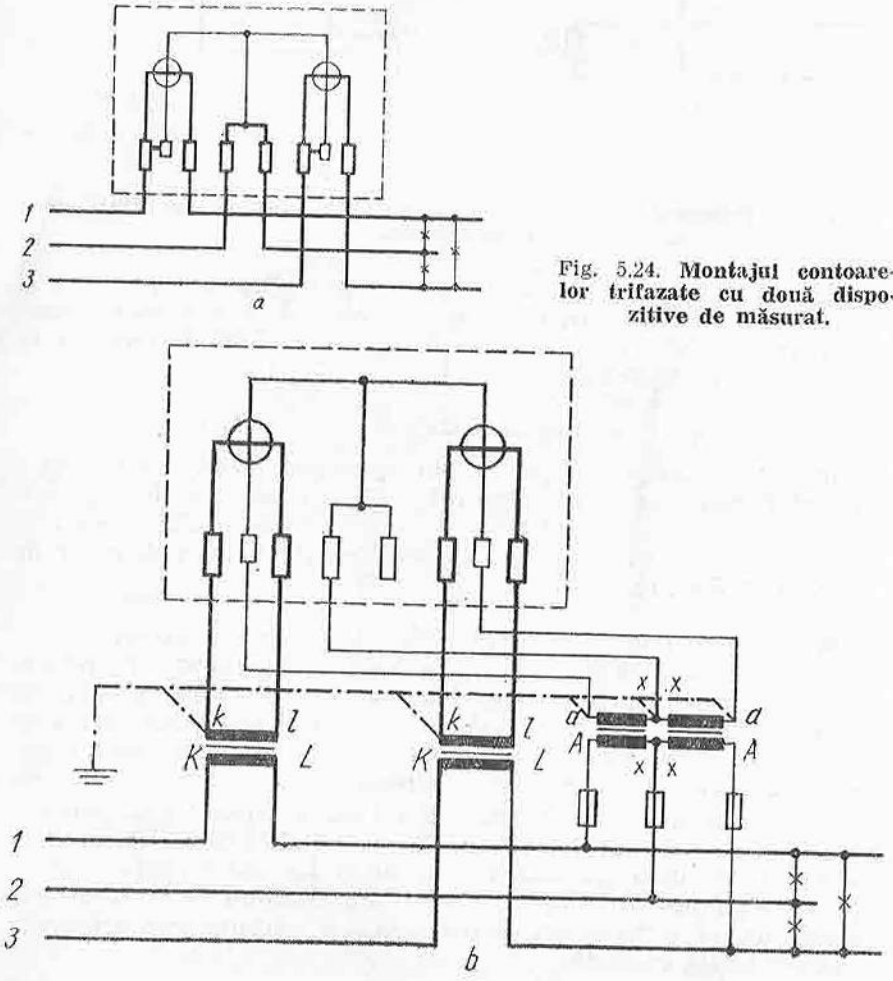


Fig. 5.24. **Montajul contoarelor trifazate cu două dispozitive de măsurat.**

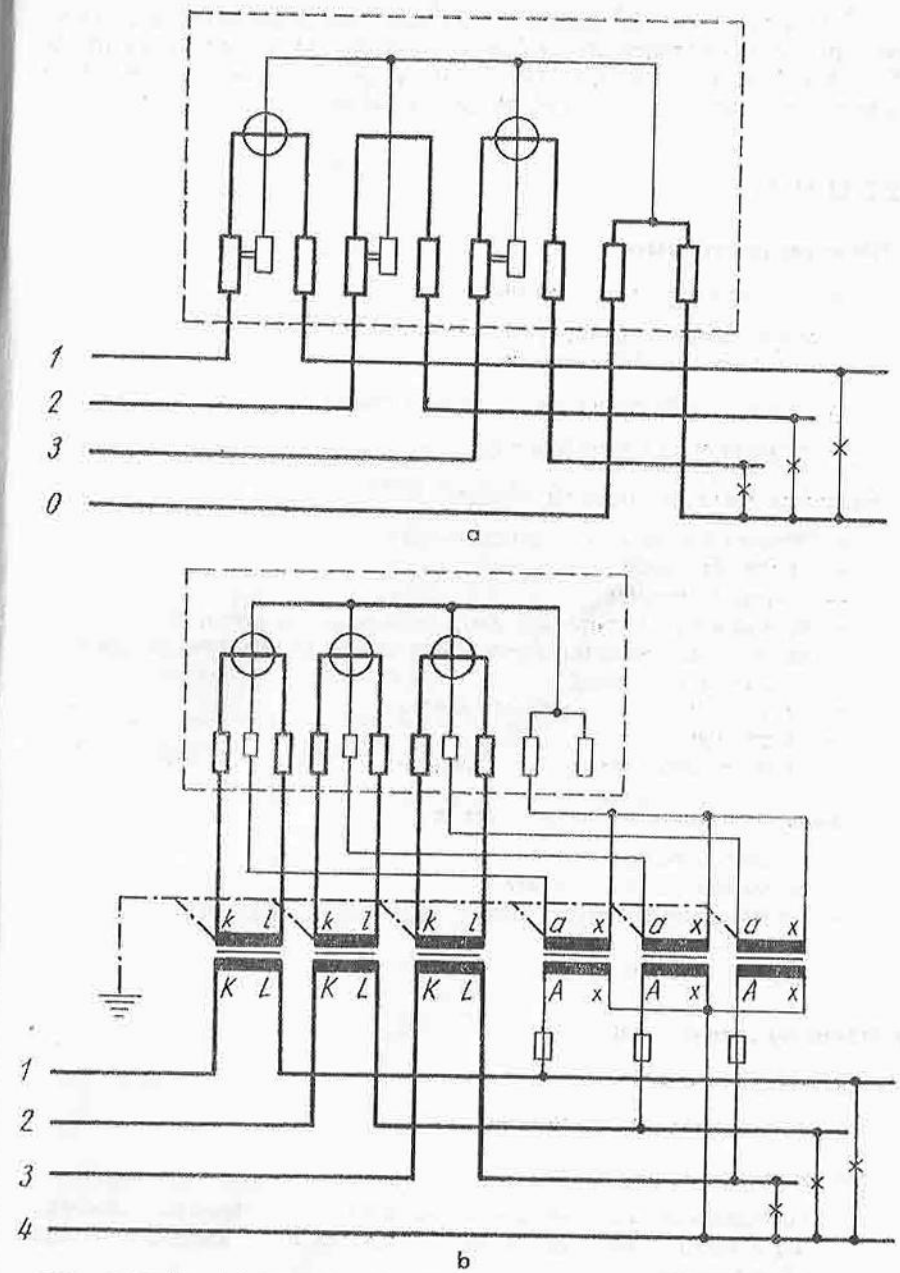


Fig. 5.25. **Montajul contoarelor trifazate cu trei dispozitive de măsurat.**

„Întreprinderea de aparate electrice de măsurat" din Timişoara produce contoare de inducţie monofazate pentru curenţi de 2,5 şi 4,5 A şi tensiuni de 110 şi 240 V, în clasa de precizie 2, şi contoare trifazate de aceeaşi clasă de precizie.

REZUMAT

- **Măsurarea puterii active**

Măsurarea puterii în curent continuu :

— metoda ampermetrului şi voltmetrului ;
— cu wattmetrul electrodinamic.

Măsurarea puterii în curent alternativ monofazat :

— cu wattmetrul electrodinamic.

Măsurarea puterii în circuitele trifazate :

a. circuite trifazate fără conductor neutru :
— cu trei wattmetre ;
— cu două wattmetre ;
— cu wattmetru trifazat (cu două dispozitive de măsurat) ;
— cu un singur wattmetru monofazat în circuite cu tensiuni simetrice şi curenţi echilibraţi.
b. circuite trifazate cu conductor neutru :
— cu trei wattmetre ;
— cu wattmetru trifazat (cu trei dispozitive de măsurat).

Măsurarea puterii în frecvenţe înalte :

— cu wattmetre de ieşire ;
— cu wattmetre cu redresoare ;
— cu wattmetre cu termocupluri ;
— cu osciloscopul catodic ;
— prin metoda fotometrică.

- **Măsurarea puterii reactive :**

Măsurarea indirectă :

— cu ampermetrul şi voltmetrul.

Măsurarea directă :

— cu wattmetre electrodinamice, cu bobinele de tensiune alimentate cu o tensiune defazată cu 90° în urma tensiunii aplicată circuitului de măsurare ;
— cu varmetre electrodinamice.

- **Măsurarea energiei electrice active :**

Măsurarea în curent continuu :
— cu contor electrodinamic.

Măsurarea în curent alternativ monofazat :

— cu contor de inducţie monofazat.

Măsurarea în curent alternativ trifazat :

— cu două contoare monofazate ;
— cu contoare trifazate.

ÎNTREBĂRI DE CONTROL

1. Care sînt schemele şi relaţiile de calcul a montajelor de măsurare a puterii active cu metoda ampermetrului şi voltmetrului ?
2. Care sînt montajele de măsurare a puterii active cu ajutorul wattmetrului electrodinamic ?
3. Măsurarea puterii active trifazate cu schema celor două wattmetre.
4. Care sînt schemele de măsurare a puterii active trifazate prin intermediul transformatoarelor de măsurat ?
5. Care sînt metodele de măsurare a puterii active în frecvenţe înalte ? Măsurarea puterii cu wattmetrul de ieşire.
6. Care este principiul metodei de măsurare a puterii reactive cu ajutorul wattmetrelor ?
7. Care este construcţia şi funcţionarea varmetrelor electrodinamice ?
8. Care este construcţia şi funcţionarea contorului electrodinamic ?
9. Care este construcţia şi funcţionarea contorului de inducţie ?

Cuprins

Cap. I. **Măsurări și aparate de măsurat electrice** 3

A. *Măsurări, mijloace și metode de măsurare* 3
B. *Aparate de măsurat electrice* 6
1. Principiul de funcționare al aparatelor de măsurat electrice . 6
2. Clasificarea aparatelor de măsurat electrice 8
3. Caracteristicile metrologice ale aparatelor de măsurat electrice 9
C. *Erori de măsurare* 10

Cap. II. Aparate de măsurat analogice 15

A. *Principiul de funcționare* 15
B. *Clasificarea aparatelor de măsurat analogice* 16
C. Părțile componente ale aparatelor de măsurat analogice . . 19
1. Dispozitivul de măsurat 19
2. Traductorul 23
3. Accesoriile 26
D. *Dispozitive de măsurat analogice* 26
1. Dispozitivele de măsurat magnetoelectrice 26
2. Dispozitivele de măsurat feromagnetice 28
3. Dispozitivele de măsurat electromagnetice și ferodinamice . 31
4. Dispozitivele de măsurat de inducție 34
5. Dispozitivele de măsurat electrostatice 37
6. Dispozitivele de măsurat logometrice 40

Cap. III. **Măsurarea curenților și tensiunilor** 45

A. *Măsurarea curenților și tensiunilor foarte mici cu galvanometrul* 45
B. *Măsurarea curenților și tensiunilor cu ampermetre și voltmetre* 48
C. *Ampermetre și voltmetre magnetoelectrice cu redresoare* . . . 55
D. *Ampermetre și voltmetre cu termocuplu* 60

Cap. IV. **Măsurarea rezistențelor** 64

A. *Măsurarea rezistențelor prin metode de punte* 64
1. Puntea Wheatstone 65
2. Puntea dublă Thomson 67

B. *Măsurarea rezistențelor cu ampermetrul și voltmetrul* 68
1. Metoda ampermetrului și voltmetrului 68
2. Metode de comparație 70
C. *Măsurarea rezistențelor cu aparate indicatoare* 71
1. Ohmmetre 72
2. Megohmmetre 73

Cap. V. **Măsurarea puterii și energiei electrice** 76

A. *Măsurarea puterii active* 76
1. Măsurarea puterii în circuitele de curent continuu cu ampermetrul și voltmetrul 76
2. Măsurarea puterii active cu wattmetrul în circuitele de curent continuu și de curent alternativ monofazat . . . 77
3. Măsurarea puterii active în circuite trifazate 79
4. Măsurarea puterii active la frecvențe înalte 84
B. *Măsurarea puterii reactive* 91
1. Măsurarea indirectă a puterii reactive 91
2. Măsurarea directă a puterii reactive cu wattmetrul 92
3. Măsurarea directă a puterii reactive cu varmetrul electrodinamic 94
C. *Măsurarea energiei electrice active* 95
1. Măsurarea energiei electrice în circuitele de curent continuu 95
2. Măsurarea energiei electrice în circuitele de curent alternativ 97

Coli de tipar : 6,75
Tiraj : 20.500+65 broșate
Bun de tipar : 17.06.1975
Nr. Plan Editură : 10134

Tiparul executat sub cd. 132 la I. P. „Filaret", str. Fabrica de chibrituri nr. 9—11, București
Republica Socialistă România