

7 . | MASURAREA TENSIUNILOR SI A CURENTILOR ELECTRICI

Masurarea tensiunilor electrice la bornele circuitelor electronice se realizeaza cu ajutorul voltmetrelor, aparate ce se conecteaza în paralel cu montajul analizat la bornele dorite.

Intensitatea curentului electric din latura unui circuit electronic se masoara cu ajutorul ampermetrelor, aparate ce se înseriaza în latura dorita (cercetata).

Exista o foarte mare diversitate a sistemelor de masurare a celor doua marimi de baza, motiv pentru care alegerii acestora în vederea efectuării unei masurari trebuie sa i se acorde o atentie sporita. Câteva din criteriile de baza care se au în vedere la alegerea sistemului de masurare sunt prezentate în continuare:

- regimul de functionare al circuitului în care se efectueaza masurarea (stationar, cvasistationar, variabil);
- natura marimii electrice de circuit masurate (curent, tensiune);
- ordinul de marime al marimii masurate si gama posibila de variatie a acesteia;
- precizia impusa masurarii;
- domeniul de frecvente si viteza de lucru;
- influenta factorilor perturbatori externi (temperatura, câmpuri electrice sau magnetice) asupra sistemului de masurare;
- versatilitatea sistemului de masurare;
- disponibilitatile materiale ale operatorului.

Este evident faptul ca introducerea unui sistem de masurare într-un circuit electric în vederea masurarii unei marimi electrice (tensiune, curent) determina o perturbare a acesteia. Este necesar ca aceasta perturbare sa fie minima, cerinta realizata prin alegerea unor sisteme de masurare cu consumuri proprii reduse (ampermetre cu rezistente interne cât mai mici, voltmetre cu rezistente interne cât mai mari).

Din punctul de vedere al formei de unda a marimilor masurate, sistemele de masurat se împart în doua categorii: de curent continuu si de curent alternativ.

7.1. MASURAREA TENSIUNILOR CONTINUE

7.1.1. Voltmetre magnetoelectrice

Voltmetrele magnetoelectrice sunt cele mai simple aparate analogice destinate masurarii tensiunilor continue. Functionarea lor se bazeaza pe interactiunea dintre câmpul magnetic B produs de un magnet permanent si o bobina parcursa de un curent I . Din punctul de vedere al constructiei, dispozitivele magnetoelectrice se pot realiza în urmatoarele variante:

- 1) dispozitiv magnetoelectric cu bobina mobila si magnet exterior (variante de baza);
- 2) dispozitiv magnetoelectric cu bobina mobila si constructie concentrica;
- 3) dispozitiv magnetoelectric cu bobina mobila;
- 4) dispozitiv magnetoelectric cu magnet mobil si bobina fixa.

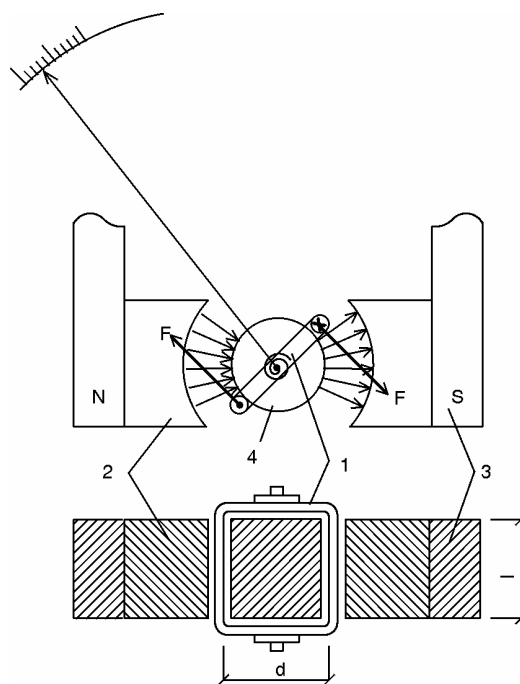


Fig. 7.1

Constructia si functionarea dispozitivului magnetoelectric cu bobina mobila si magnet permanent pot fi studiate cu ajutorul schemei din figura 7.1. Bobina mobila 1, în forma de cadru dreptunghiular, parcursa de curentul I , se poate roti liber într-un întrefier redus format de piesele polare 2 ale magnetului permanent 3 si miezul cilindric 4. Câmpul magnetic creat de magnetul permanent are un spectru radial si omogen, inducția magnetică B din întrefier fiind constantă, indiferent de poziția bobinei.

Forța magnetoelectrică elementară ce se exercită asupra unui element $d\vec{l}$ al conductoarelor bobinei este:

$$d\vec{F} = I(d\vec{l} \times \vec{B}),$$

iar forța Laplace ce acționează asupra unui conductor (în cazul figurii 7.1) este:

$$F_{cond} = B \cdot I \cdot l,$$

unde l este lungimea activă a unui conductor al bobinei.

Expresia cuplului activ ce actioneaza asupra unei spire a bobinei M_{asp} este:

$$M_{asp} = 2 \cdot F_{cond} \cdot \frac{d}{2},$$

iar cuplul activ rezultat M_a va fi:

$$M_a = N \cdot M_{asp} = N \cdot F_{cond} \cdot d = N \cdot B \cdot l \cdot d \cdot I = kI,$$

unde: $k = N \cdot B \cdot l \cdot d$ este o constanta constructiva denumita *constanta dinamica a aparatului*, în care N este numarul de spire al bobinei.

Cuplului activ, care tinde sa imprime o miscare de rotatie sistemului mobil, i se opune cuplul rezistent determinat de elemente elastice (resorturi spirale, benzi tensionate sau fire de torsiune) a carui expresie este de forma:

$$M_r = -D \cdot \alpha,$$

în care D este cuplul rezistent specific, iar α – unghiul de deviatie al sistemului mobil.

La echilibru, $M_a + M_r = 0$, adica:

$$kI = D \cdot \alpha,$$

sau:

$$\alpha = \frac{k}{D} \cdot I = S_I \cdot I,$$

unde: $S_I = \frac{k}{D}$ reprezinta sensibilitatea de curent a dispozitivului magnetoelectric (în diviziuni pe amper).

Daca U_m este tensiunea masurata, iar R_e rezistenta echivalenta (a bobinei dispozitivului magnetoelectric si a rezistentelor înseriate cu acesta) rezulta:

$$I = \frac{U_m}{R_e} = \frac{D}{k} \cdot \alpha.$$

Raportul: $\frac{U_m}{\alpha} = R_e \cdot \frac{D}{k} = C_u$ se numeste *constanta de tensiune* a voltmetrului si se exprima în V / div., iar inversul acestuia :

$$\frac{\alpha}{U_m} = \frac{k}{D} \cdot \frac{1}{R_e} = S_u$$

reprezinta *sensibilitatea de tensiune* si se masoara în div. / V.

Constanta de tensiune, C_u (valoarea diviziunii), reprezinta valoarea tensiunii care determina o deviatie de o diviziune, iar sensibilitatea de tensiune S_u reprezinta deviatia corespunzatoare unei tensiuni egale cu 1 V.

Suspensia sistemului mobil poate fi realizata pe lagare (exterioare sau interioare), pe benzi tensionate sau pe fir de torsiune. Cele trei tipuri de suspensii posibile sunt prezentate în figura 7.2. împreuna cu principalele elemente auxiliare ale dispozitivului magnetoelectric.

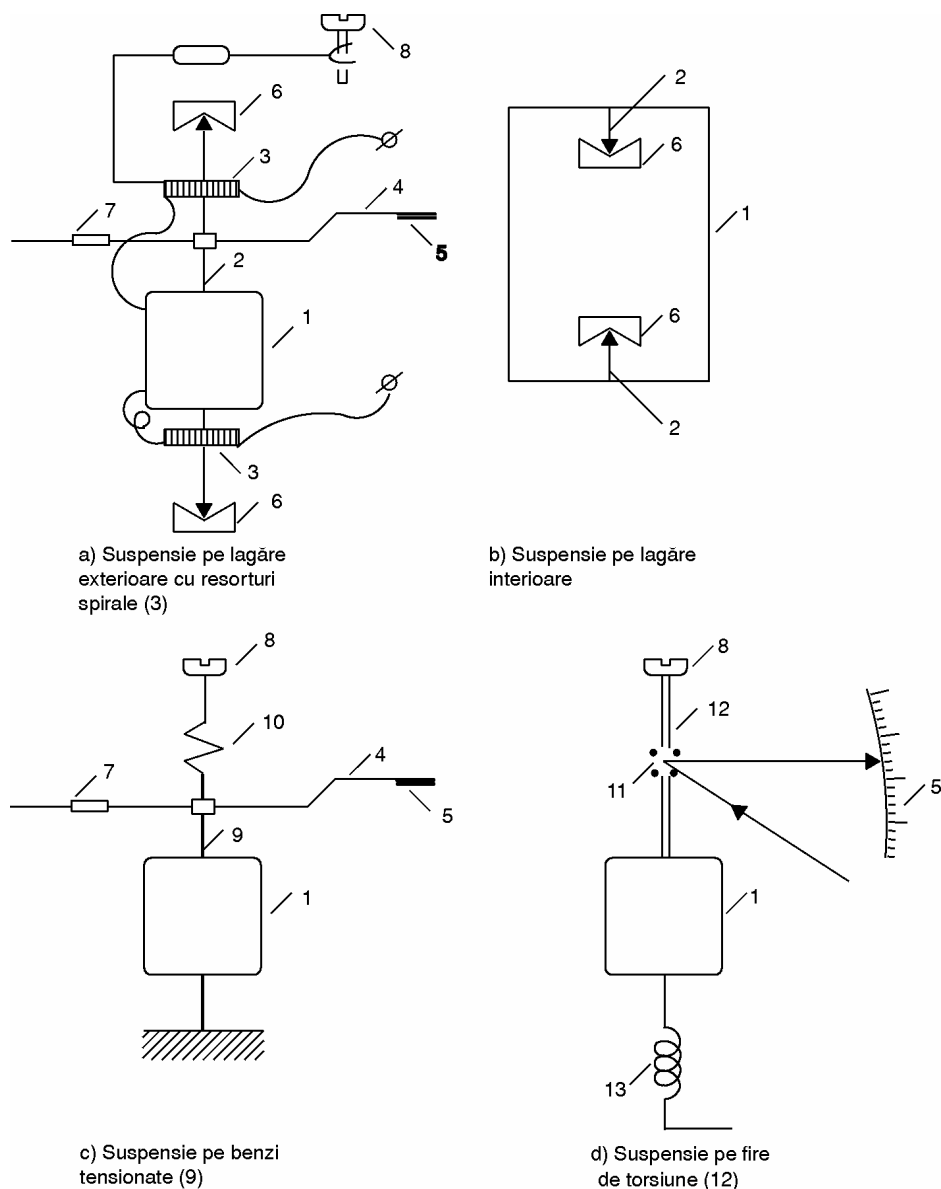


Fig. 7.2

Pe lângă funcția principală, aceea de a crea cuplul antagonist, elementele elastice (resorturile spirale – reper 3 în figura 7.2,a., benzile tensionate – reper 9 în figura 7.2,c, firul de torsiune – reperul 12 din figura 7.2,d) au și rolul de readucere la zero a acului indicator la dispariția mărimii măsurate și de reglare a punctului de zero prin surubul corector de 0 (reper 8 în figura 7.2).

Reducerea duratei și amplificării oscilațiilor sistemului mobil în jurul poziției de echilibru (amortizarea miscării) se realizează prin intermediul curentilor de frânare indusi în cadrul de aluminiu al bobinei mobile care se rotește odată cu acesta în câmpul magnetic de inducție B .

Dispozitivul magnetoelectric (v. fig. 7.2) este prevăzut cu un ac indicator 4, contragreutati pentru echilibrarea sistemului mobil 7, cu corectorul de zero 8, și scara gradată uniform 5. Pentru aparatele cu clasă de precizie 0,2 și 0,1 este utilizat un sistem optic de citire a indicațiilor cu spot luminos și scara interioară. Celelalte notații din figura 7.2 indică: 1 – bobina mobilă, 2 – ax din oțel, 6 – lagare, 10 – arc de întindere, 11 – oglindă și 13 – fir de aducțiune.

Deviația α a sistemului mobil depinde liniar ($\alpha = kU$) de tensiunea aplicată și de curentul ce străbate bobina mobilă ($\alpha = kI$). Astfel, la schimbarea sensului curentului prin bobina se va schimba sensul cuplului electromagnetic și al deviației, motiv pentru care aparatele magnetoelectrice au bornele marcate distinctiv cu semnele + și –.

Unele dintre performanțele aparatelor magnetoelectrice pot fi îmbunătățite prin anumite modificări constructive ale variantei de bază. Astfel, o utilizare optimă a materialelor magnetice și o ecranare eficientă împotriva câmpurilor magnetice exterioare se pot obține prin utilizarea aparatelor magnetoelectrice cu bobina mobilă și construcție concentrică (fig. 7.3), iar reducerea gabaritului (fără afectarea lungimii scării) prin utilizarea unor dispozitive magnetoelectrice cu bobina mobilă unilaterală (fig. 7.4.).

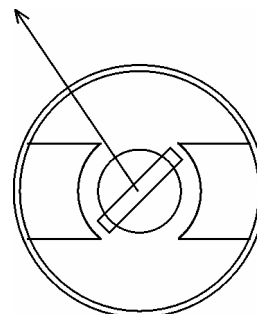


Fig. 7.3

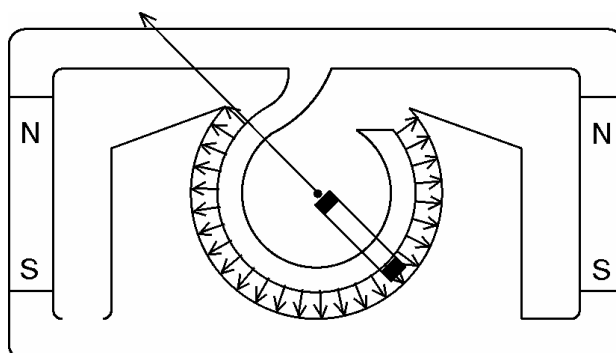


Fig. 7.4

Extinderea domeniului de măsurare a voltmetrelor magnetoelectrice se realizează cu ajutorul unor rezistențe aditionale R_{ad} , executate din manganina.

Dacă R_V este rezistența bobinei voltmetrului, U_V – domeniul de măsură al acesteia și $U = nU_V$ valoarea tensiunii de măsurat, rezistența aditională R_{ad} se calculează cu relația:

$$U = I_V(R_V + R_{ad}) = nU_V = nR_V I_V,$$

de unde:

$$R_{ad} = R_V(n - 1).$$

Schemele de principiu ale voltmetrului cu un singur domeniu de măsurare (a) și cu domenii multiple (b) sunt prezentate în figura 7.5.

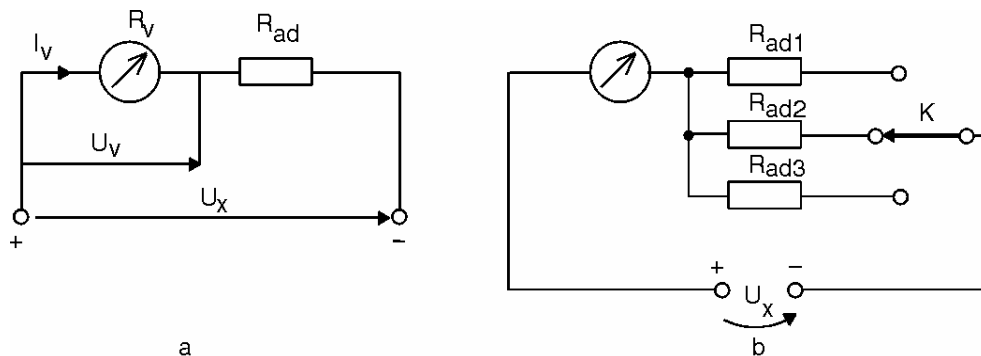


Fig. 7.5

Cel mai important dezavantaj al unui voltmetru magnetoelectric este determinat de rezistența de intrare de valoare redusă ceea ce face ca măsurarea tensiunii să se realizeze cu un consum ridicat de la sursa de măsurat, care astfel nu mai lucrează în “gol”, precum și de fragilitatea lor la socurile mecanice și la vibrații.

Voltmetre magnetoelectrice cu amplificator. Pentru îmbunătățirea unora din performanțele voltmetrelor magnetoelectrice (sensibilitatea și rezistența de intrare) se pot utiliza amplificatoare electronice dispuse în amonte de dispozitivul indicator.

Amplificatoarele electronice utilizate pot fi cu cuplaj direct sau cu modulare-demodulare. Schema bloc (de principiu) a unui voltmetru cu amplificator electronic de curent continuu cu cuplaj direct și cu instrument magnetoelectric este arată în figura 7.6, iar o detaliere a acestei scheme este prezentată în figura 7.7.

Atenuatorul de la intrare permite modificarea sensibilității voltmetrului, filtrul trece-jos *FTJ* suprimă eventualele componente alternative ale mărimii măsurate, iar prin reacția negativă *CR* se realizează creșterea stabilității caracteristicilor de transfer ale amplificatorului.

O crestere si mai importanta a sensibilitatii, ca si eliminarea derivei la masurarea tensiunilor de nivel redus, se asigura prin utilizarea amplificatoarelor electronice cu modulare-demodulare (v. cap. 2). Schema bloc a unui astfel de amplificator este prezentata în figura 7.8.

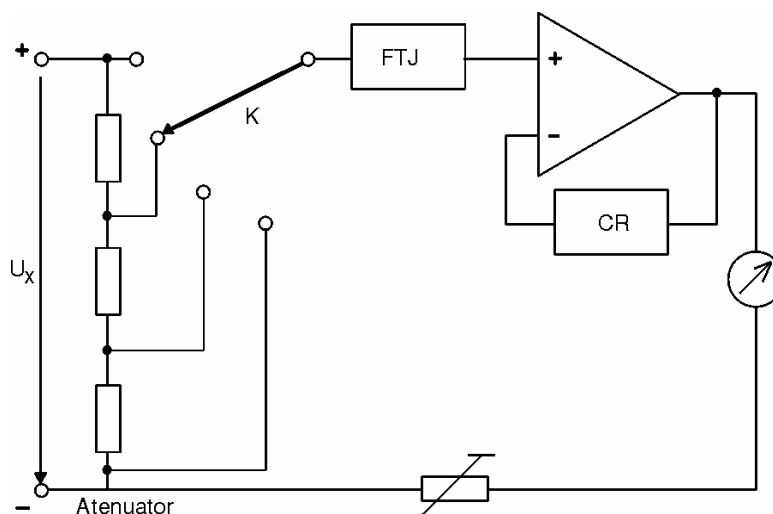


Fig. 7.6

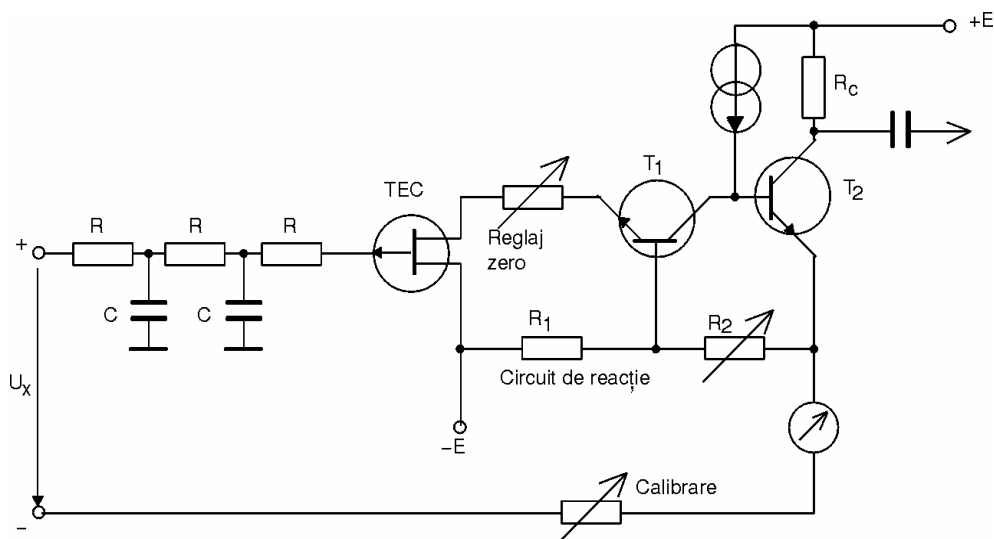


Fig. 7.7

Semnalul de la iesirea atenuatorului este transformat într-o tensiune alternativa cu ajutorul modulatorului, tensiune care este amplificata de catre un amplificator de curent alternativ cu banda de trecere si câstigul foarte stabile.

Tensiunea alternativă obținută este redresată și ulterior amplificată, obținându-se în final o tensiune continuă proporțională cu tensiunea de intrare care se măsoară cu ajutorul unui voltmetru magnetoelectric.

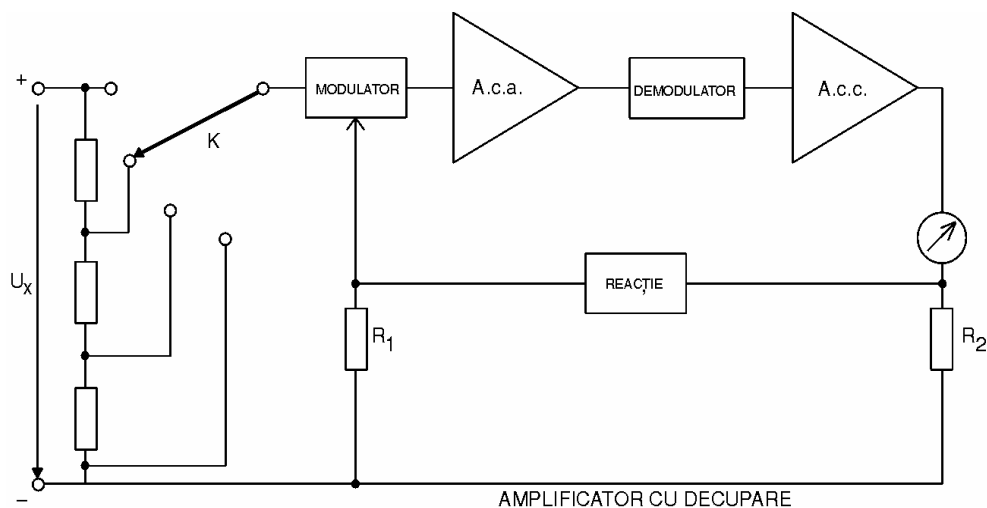


Fig. 7.8

Voltmetrul magnetoelectric în punte. Se realizează prin introducerea unui voltmetru magnetoelectric în diagonala de măsură a unei punți de curent continuu (Wheatstone), în laturile careia sunt rezistențe și tranzistoare, conform schemei de detaliu a exemplului, prezentată în figura 7.9.

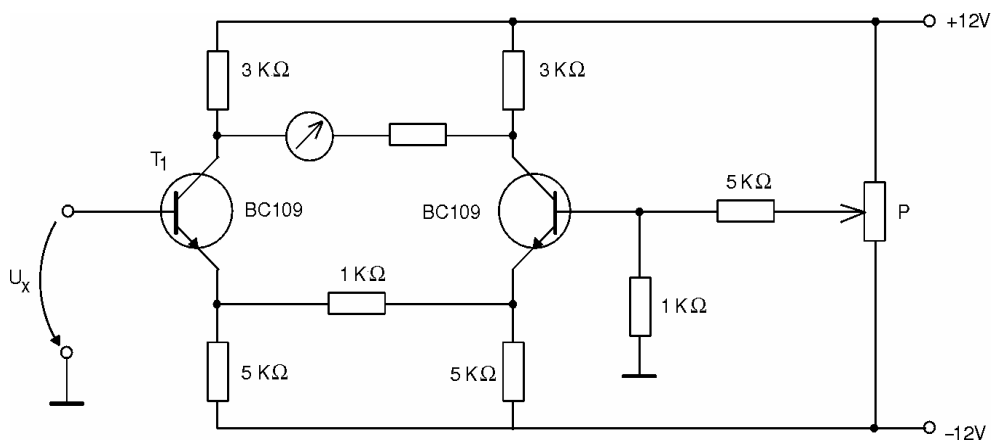


Fig. 7.9

În absența semnalului de intrare, tensiunea de dezechilibru a punții este nulă. La aplicarea semnalului de măsurat U_x pe baza tranzistorului T_1 , puntea se dezechilibrează iar tensiunea de dezechilibru a punții, măsurată de aparatul magnetoelectric, este proporțională cu tensiunea aplicată la intrare.

Voltmetre magnetoelectrice cu compensare. Metoda de masurare prin compensatie (metoda de zero) se foloseste în general pentru masurarea tensiunilor mici si foarte mici si prezinta doua calitati remarcabile:

- permit realizarea masurarii fara consum de putere din circuitul de masurare;
- precizia masurarii este ridicata atîngînd valori de la $\pm 10^{-4}$ la $\pm 10^{-6}$.

Schema de principiu pentru masurarea tensiunilor continue prin metoda compensatiei este prezentata în figura 7.10.

Tensiunea necunoscuta, de valoare U_x , se compara cu o tensiune a carei valoare este cunoscuta cu mare precizie U_N . Cu ajutorul potentiometrului P se modifica tensiunea de iesire a divizorului rezistiv pîna cînd aparatul magnetoelectric (detectorul de nul) DN indica valoarea 0.

La echilibru:

$$U_x = r \cdot I_a = r \cdot \frac{U_N}{R},$$

sau:

$$U_x = \frac{r}{R} \cdot U_N.$$

Rezistentele r si R sunt cunoscute (pot fi rezistoare de precizie decadice), iar sursa de tensiune de referinta U_N este un etalon de tensiune (v. cap. 1). În figura 7.11 este prezentata schema unui voltmetru electronic de curent continuu cu compensare.

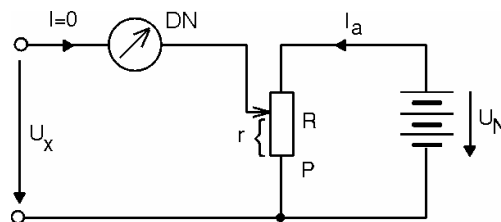


Fig. 7.10

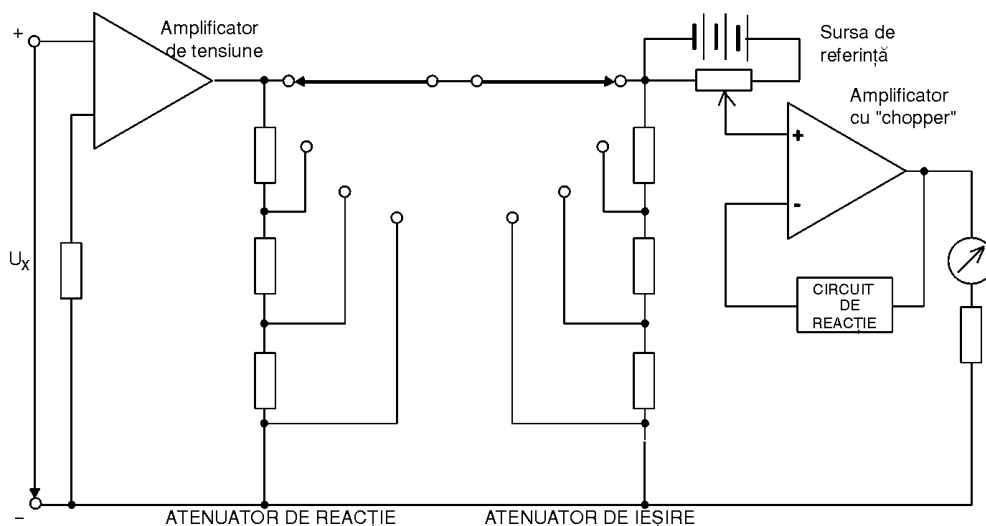


Fig. 7.11

Schema cuprinde un amplificator de tensiune continua cu factor mare de amplificare, un circuit de reactie cu atenuator prin care se asigura o rezistenta de intrare de valoare ridicata, un atenuator de iesire pentru extinderea domeniului de masura si adaptarea tensiunii de la iesirea amplificatorului de tensiune la tensiunea redusa a sursei de referinta, un amplificator cu "chopper" cu circuit de reactie pentru controlul stabilitatii si indicatorul de zero (instrument magnetoelectric cu 0 la mijlocul scalei).

7.1.2. Voltmetre electrodinamice

Functionarea aparatelor electrodinamice se bazeaza pe actiunea fortelor electrodinamice ce se exercita între conductoare parcurse de curenti electrici de conductie.

Din punctul de vedere constructiv, un dispozitiv electrodinamic (v. fig. 7.12.) este alcatuit din doua bobine fixe cilindrice coaxiale identice 1 si dintr-o bobina mobila 2 rotunda sau dreptunghiulara.

Daca bobinele fixe sunt amplasate pe miezuri feromagnetice, aparatele se numesc *ferodinamice*.

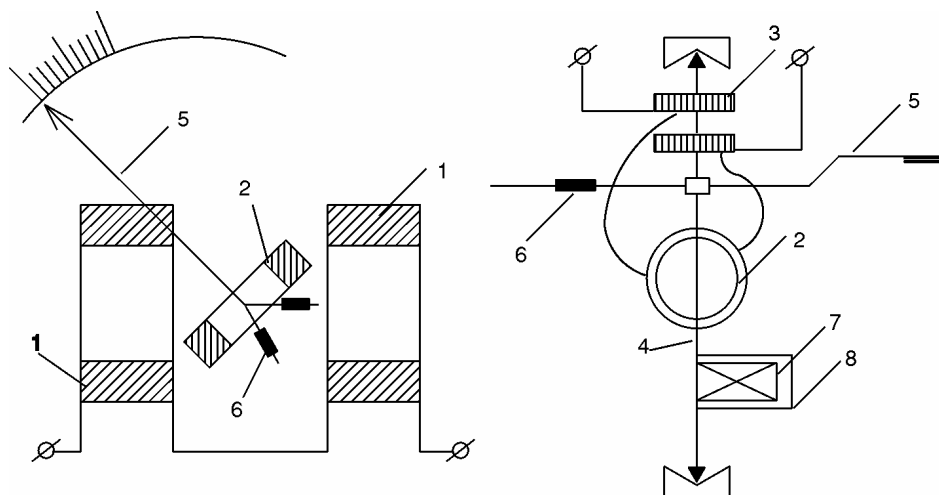


Fig. 7.12

Cuplul rezistent poate fi creat pe cale mecanica (resorturi spirale, benzi tensionate sau fire de torsiune) sau pe cale electrica (logometre electro sau ferodinamice). Bobina mobila, care de regula se alimenteaza prin cele doua resorturi spirale 3 care creeaza si cuplul antagonist, este fixata pe axul 4, pozitionat perpendicular pe axa de simetrie a bobinei fixe. Solidare cu axul sistemului mobil sunt si acul indicator 5 cu contragreutatele 6 si paleta 7 a amortizorului pneumatic 8.

Când bobinele fixa si mobila sunt parcurse de curentii constanti I_1 si respectiv I_2 iau nastere forte electrodinamice ce produc un cuplu electromagnetic

M_a care tinde să rotească sistemul mobil. Expresia cuplului activ M_a se poate stabili pornind de la expresia energiei electromagnetice înmagazinate în câmpul magnetic al celor două bobine:

$$W_{em} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + \frac{1}{2} L_{12} I_1 I_2 ,$$

unde: L_1 și L_2 sunt inductivitățile proprii ale celor două bobine, iar $L_{12} = L_{21}$ este inductivitatea mutuală.

Aplicând teorema forțelor generalizate se obține:

$$M_a = \frac{dW_{em}}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dL_{12}}{d\alpha} , \quad (7.1)$$

deoarece numai inductivitatea mutuală L_{12} variază cu deviația α a sistemului mobil.

La echilibru, cuplul rezistent (dat de resorturile spirale) egalează cuplul activ:

$$M_a = -M_r = D \cdot \alpha ,$$

unde D este cuplul rezistent specific.

Astfel, pentru deviația α se obține:

$$\alpha = \frac{1}{D} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dL_{12}}{d\alpha} . \quad (7.2)$$

Modul în care se modifică inductivitatea mutuală L_{12} în funcție de deviația α este determinat de spectrul câmpului magnetic produs de bobinele fixe în zona în care se deplasează bobina mobilă. În cazul unui *câmp magnetic uniform* inductivitatea mutuală L_{12} variază după o lege cosinusoidală în funcție de unghiul Ψ dintre planele bobinelor:

$$L_{12} = -L_{12\max} \cos \Psi ,$$

unde: $\Psi = \Psi_0 + \alpha$; Ψ_0 – unghiul format de planele bobinelor în absența semnalului de măsurat; α – unghiul de deviație al sistemului mobil pentru o anumită valoare a mărimii măsurate.

Pentru un *câmp magnetic radial*, se poate aproxima: $\frac{dL_{12}}{d\alpha} = k$, astfel încât relațiile (7.1) și (7.2) devin:

$$M_a = k \cdot I_1 \cdot I_2$$

și

$$\alpha = \frac{k}{D} \cdot I_1 \cdot I_2 .$$

Daca $I_1 = I_2 = \frac{U_m}{R_e}$ (unde U_m este tensiunea de masurat, iar R_e – rezistenta echivalenta a bobinei si rezistoarelor aditionale), atunci:

$$\alpha = \frac{k}{D} \cdot \frac{U_m^2}{R_e^2}$$

si scara aparatului este patratica.

Voltmetrele electrodinamice sunt aparate precise (clasa de precizie 0,1 si 0,2) si se construiesc ca aparate de laborator cu 3 sau mai multe domenii de masurare. Pentru un domeniu de masurare de 300 V, consumul propriu este de cca. 20 VA. Ele sunt puternic influentate de câmpurile magnetice exterioare.

Reducerea consumului propriu, a influentei câmpurilor magnetice exterioare ca si realizarea unui cuplu activ mai puternic se obtin prin utilizarea dispozitivelor ferodinamice. Acestea au o constructie mai simpla si mai robusta, pot avea o deschidere a scarii gradate de 90° sau 240° (dispozitivul cu bobina unilaterala), dar sunt mai puțin precise (clasa de precizie este de la 0,5 la 2,5).

7.1.3. Voltmetre electrostatice

Asupra armaturilor unui condensator electric, aflate la potentiale diferite, se exercita forte electrostatice de atractie care tind sa mareasca atât capacitatea condensatorului cât si energia electrostatica înmagazinata în câmpul electric al acestuia. Modificarea capacitatii se poate realiza fie prin modificarea suprafetei active a armaturilor, fie prin modificarea distantei dintre armaturi.

Schema de principiu a unui voltmetru electrostatic cu variatia suprafetei active a armaturilor este prezentata în figura 7.13. El este format din doua armaturi metalice fixe 1 de forma unor sectoare de cilindru foarte plat si o armatura mobila 2 din aluminiu de forma unui dublu sector de cerc. Armatura mobila este solidara cu axul 4 al sistemului mobil, ax pe care este fixat acul indicator 3 ce se deplaseaza în fata scalei gradate 7. Cuplul rezistent este produs de resorturile spirale 5, iar amortizarea oscilatiilor se realizeaza cu amortizorul pneumatic cu paleta 6. Cresterea sensibilitatii voltmetrului se poate obtine prin realizarea suspensiei pe benzi tensionate sau fire de torsiune.

Expresia cuplului activ al voltmetrului electrostatic M_a se determina plecând de la expresia energiei electrostatice W_e înmagazinata în condensatorul format de armaturile fixe si cea mobila:

$$W_e = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}C(V_1 - V_2)^2.$$

Conform teoremei fortelor generalizate:

$$M_a = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2.$$

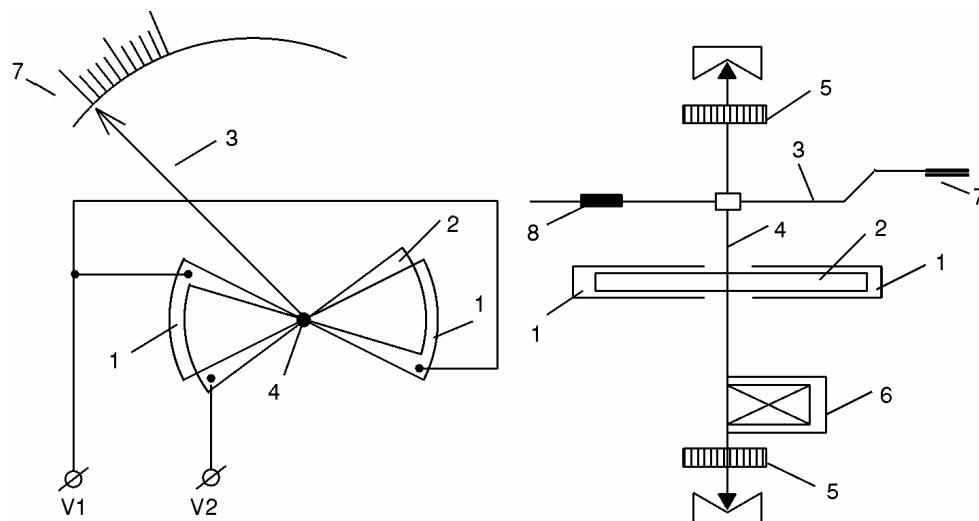


Fig. 7.13

Armatura mobila se va deplasa sub actiunea cuplului activ M_a pâna când acesta va fi egalat de cuplul rezistent M_r (dat de resorturile spirale sau firul de torsiune): $M_r = -D \cdot \alpha$.

În acest fel, pentru deviatia α a sistemului mobil se obtine relatia:

$$\alpha = \frac{M_a}{D} = \frac{1}{2D} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = k \cdot U^2.$$

La masurarea tensiunilor de valori mici (sub 30 V), pentru marirea cuplului activ se executa constructii multicelulare (figura 7.14, cu aceeasi semnificatie a notatiilor ca în figura 7.13) ce au drept scop marirea capacitatii echivalente a sistemului.

Datorita formei de sector de cerc a armaturii mobile, raportul $\frac{dC}{d\alpha}$ este constant, iar scara dispozitivelor electrostatice este patratica.

Voltmetrele electrostatice au consum propriu redus, iar functionarea lor nu este influentata de temperatura si câmpurile magnetice exterioare. Influenta câmpurilor electrice se elimina prin ecranarea electrostatica a dispozitivului

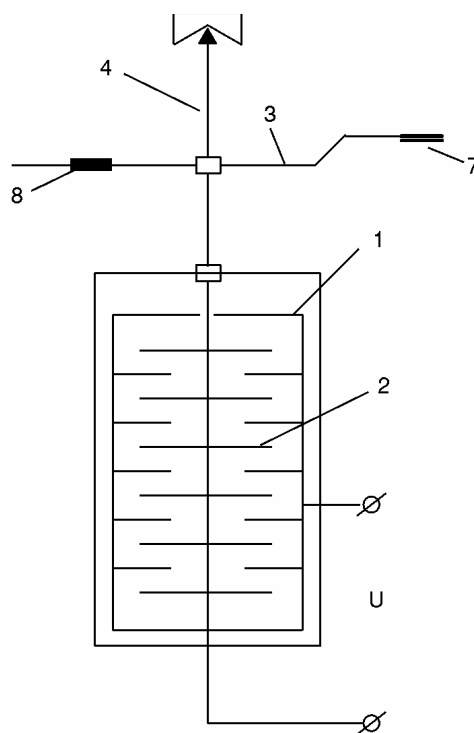


Fig. 7.14

de masurat, iar extinderea domeniului de masura se realizeaza prin utilizarea unor capacitati aditionale sau a divizoarelor capacitive de tensiune.

7.1.4. Voltmetre numerice

Voltmetrele numerice (*DVM* – “Digital VoltMeter”) sunt aparate care afiseaza rezultatul masurarii direct sub forma numerica. Fata de voltmetrele analogice de c.c. aceste aparate ofera urmatoarele avantaje: viteza de raspuns ridicata, precizie foarte buna, posibilitatea transmiterii la distanta a informatiei prin canale radio sau cu fir, ca si posibilitatea prelucrarii directe a acesteia cu ajutorul calculatoarelor, eliminarea erorilor de citire si comoditatea citirii rezultatului masurarii.

Principalele caracteristici ale voltmetrelor digitale sunt:

- *precizia*, ce reprezinta eroarea minima posibila (în conditii standard) exprimata în % din valoarea citita sau din limita superioara a domeniului de masurare. Ea este corelata cu numarul de digiti afisati. Astfel, daca un instrument cu 3 digiti are o precizie de $\pm 0,1\%$, un instrument cu 6 digiti are o precizie de $\pm 0,0001\%$;

- *rezolutia*, care este data de valoarea minima a variatiei marimii de masurat pe care aparatul o poate sesiza pe un anumit domeniu de masurare. Ea depinde, deci, de domeniul de masurare utilizat si are valoarea minima pentru domeniul cel mai mic;

- *viteza de masurare*, ce se defineste ca un raport între numarul ordinilor numerice afisate (n) si timpul de masurare sau de decizie (t_d):

$$v = k \cdot \frac{n}{t_d} \text{ (ordine numerice/secunda),}$$

unde k este o constanta de proportionalitate. Timpul de decizie (t_d) reprezinta intervalul de timp scurs din momentul aplicarii la intrarea *DVM*-ului a semnalului purtator de informatie, pâna la afisarea acestuia pe panoul de afisare. Viteza de masurare depinde de timpul de decizie si de numarul maxim de valori numerice (digiti) care trebuie afisate. Un voltmetru numeric este cu atât mai performant cu cât viteza de masurare este mai mare.

- *numarul domeniilor de masurare*. Este de preferat ca un *DVM* sa fie capabil a masura tensiuni cuprinse într-o gama cât mai larga (de la μV la sute de V). Acest lucru este posibil prin utilizarea în circuitul de intrare, a unor amplificatoare sau atenuatoare (divizoare de tensiune);

- *finetea*, care este calitatea unui aparat de a efectua o masurare fara a influenta (sau a influenta cât mai putin) valoarea marimii masurate. Finetea voltmetrelor numerice este determinata de valoarea impedantei de intrare care variaza între 10^6 si 10^9 ohmi ;

- *stabilitatea* voltmetrului digital se refera la variatia etalonarii în functie de temperatura, modificarea în timp a parametrilor componentelor, semnale parazite etc. Referitor la semnalele parazite ce afecteaza fidelitatea masurarii, trebuie

mentionat ca în practica se întâlnesc următoarele doua cazuri: a) semnale parazite (zgomote) suprapuse peste semnalul util de curent continuu, denumite si *zgomote de mod normal* si b) semnale parazite (zgomote) care apar la aparatele fara borna de masa (între bornele de intrare si masa) datorita unor “curenti de scurgere”, denumite si *zgomote de mod comun* (v. cap. 2). Metodele de atenuare (rejecție) a semnalelor din prima categorie (rejecția de mod normal – *NMR*) depind de tipul de conversie utilizat. O metoda uzuala foloseste la intrarea voltmetrului digital un filtru capacitiv (*RC*) care prin rejecția zgomotelor mareste precizia masurarii dar va micsora viteza de masurare. Rejecția zgomotului de mod comun (*CMR*) se poate realiza prin metodele prezentate în capitolul 2.

Exista o mare diversitate de voltmetre digitale a caror functionare se bazeaza pe trei principii fundamentale :

a) *metoda comparatiei* consta în compararea tensiunii de masurat cu o tensiune de referinta. Se regleaza marimea de comparatie (de referinta) pâna la obtinerea egalitatii cu tensiunea de masurat. Modificarea tensiunii de referinta se poate realiza continuu, în trepte sau prin aproximatii succesive;

b) *metoda conversiei* tensiunii continue analogice într-o marime usor de digitizat (utilizând convertoare tensiune/timp sau convertoare tensiune / frecventa);

c) *metoda mixta* care utilizeaza o combinatie a metodei comparatiei si a conversiei.

Voltmetre numerice cu comparatie. La aceste voltmetre, tensiunea de masurat se compara cu o tensiune de referinta (etalon) ce poate fi generata în doua moduri:

1) în trepte crescatoare si descrescatoare de nivele diferite (cu aproximatii succesive);

2) în trepte crescatoare de acelasi nivel.

1. *Voltmetrul digital cu aproximatii succesive*, a carui schema bloc este prezentata în figura 7.15, functioneaza pe principiul compararii tensiunii necunoscute de masurat U_x cu o tensiune de referinta U_{ref} (variabila în trepte crescatoare si descrescatoare de niveluri diferite) obtinuta la iesirea unui convertor *N/A*.

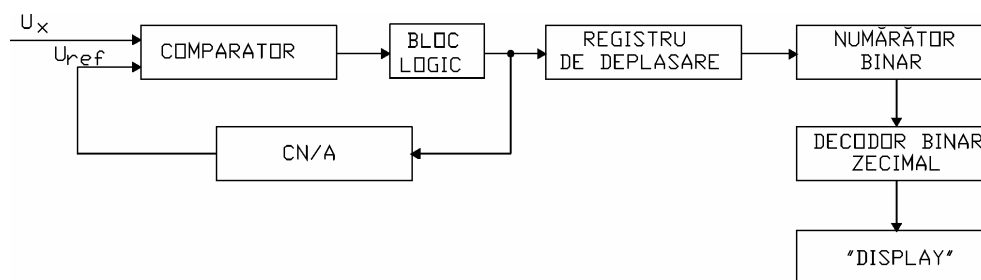


Fig. 7.15

Schema cuprinde un element comparator la intrarea caruia se aplica tensiunea analogica de masurat U_x si tensiunea de referinta U_{ref} comandata de un bloc logic, care în functie de relatia de ordine dintre cele doua tensiuni elaboreaza comenzi ce urmaresc egalizarea acestora. Egalizarea celor doua tensiuni se face

prin aproximatii succesive, adica prin modificarea în trepte de niveluri diferite a tensiunii de referinta, începând cu rangul cel mai semnificativ si continuând cu rangurile imediat inferioare (v. fig. 7.17).

În figura 7.16 este prezentata schema de detaliu a blocului logic al unui voltmetru cu aproximari succesive. Schema cuprinde un registru de deplasare format din circuitele bistabile B_2, B_4, B_6, B_8 si B_{10} si circuitele de întârziere CI , circuitele poarta P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 , convertorul numeric-analogic (CN/A) format din circuitele bistabile B_1, B_3, B_5, B_7 si B_9 , comutatoarele de nivel $CN_1, CN_2, \dots, CN_5$, rețeaua rezistivă a CN/A precum si comparatorul care va furniza un impuls la iesire numai atunci când $U_{ref} > U_x$.

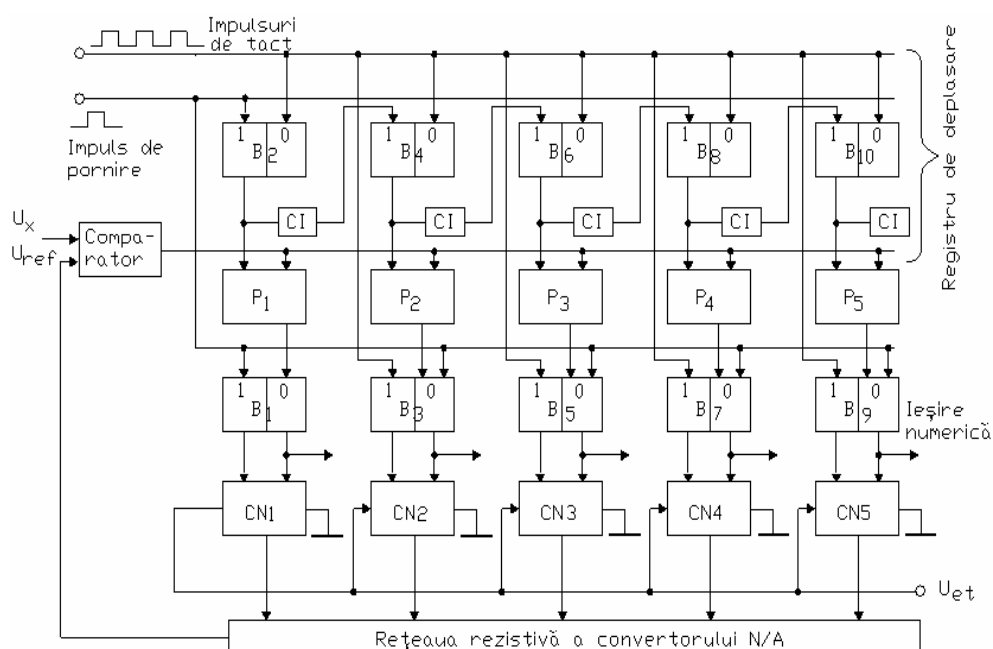


Fig. 7.16

La aplicarea impulsului de pornire bistabilele B_2 si B_1 trec în starea "1", iar celelalte circuite bistabile ($B_4, B_6, B_8, B_{10}, B_3, B_5, B_7$ si B_9) în starea "0". Prin comutatorul de nivel CN_1 , bistabilul B_1 comanda conectarea tensiunii etalon U_{et} la rezistența rețele rezistive a CN/A, care corespunde unitatii binare celei mai semnificative. La iesirea acestei rețele rezistive se va obtine treapta cea mai importanta de tensiune generata de CN/A. Fie 8V valoarea acestei tensiuni si 6,8 V valoarea tensiunii necunoscute U_x (v. fig. 7.17). Deoarece $U_{ref} > U_x$, comparatorul va genera un impuls, care prin poarta P_1 , se transmite bistabilului B_1 , pe care îl trece pe "0", anulând prin CN_1 tensiunea de la iesire. În acelasi timp, impulsul de tact de la intrare basculeaza bistabilul B_3 care comanda urmatoarea treapta de tensiune la iesirea CN/A si face sa avanseze cu o celula unitatea binara în registrul de deplasare care va trece în B_4 . Treapta de tensiune de la iesirea CN/A va corespunde unitatii binare imediat urmatoare, adica jumătate din cea precedenta (4 V).

Deoarece acum $U_{ref} < U_x$, comparatorul nu va furniza nici un impuls, astfel încât B_3 rămâne în starea în care se găsește, adică va menține cei 4 V la ieșire. La pasul următor, acestora li se vor adăuga cei 2 V proveniți de la comanda unității binare următoare a CN/A de către impulsul de tact următor. În această situație $U_{ref} = 4 + 2 = 6 \text{ V} < U_x$, deci comparatorul nu va furniza nici de această dată un impuls la ieșire. În aceste condiții, prin poarta P_3 nu se va transmite nimic, iar bistabilul B_5 își va păstra starea (în registrul de deplasare, unitatea binară a ajuns în B_6). Un nou impuls de tact aplicat la intrare va bascula bistabilul B_7 , astfel ca tensiunii de la ieșirea convertorului i se va adăuga o tensiune de 1 V. Tensiunea de referință devine $U_{ref} = 7 \text{ V} > U_x$, iar comparatorul va furniza un nou impuls. Pentru că unitatea binară din registru este în B_8 , impulsul comparatorului se va transmite prin poarta P_4 la bistabilul B_7 pe care îl readuce în starea "0", anulând astfel ultima treaptă de tensiune (de 1 V). La tactul următor basculează B_9 , ce determină apariția unei tensiuni la ieșire de 0,5 V care însumată cu tensiunile menținute până acum conduce la valoarea finală a tensiunii de referință de 6,5 V, care este valoarea cea mai apropiată de valoarea tensiunii de măsurat de 6,8 V. Această valoare (6,5 V) va apărea pe dispozitivul de afișare al aparatului. Eroarea de măsurare este de 0,3 V. O aproximare mai bună s-ar fi obținut prin creșterea numărului de unități binare ale CN/A . Secvențele variației în timp a tensiunii de referință date de CN/A sunt prezentate în figura 7.17.

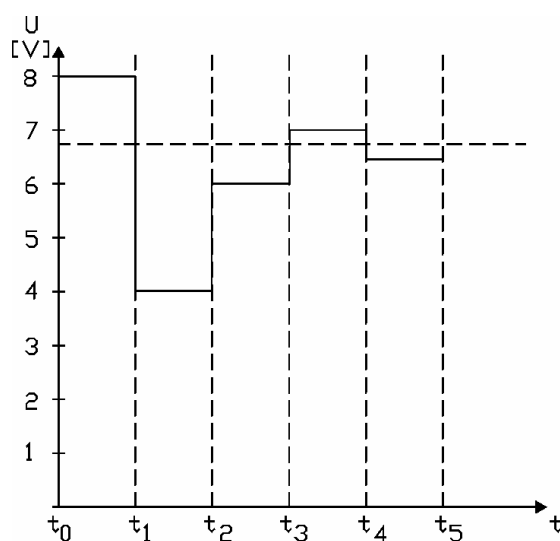


Fig. 7.17

Precizia voltmetrelor digitale cu aproximații succesive este ridicată (poate fi mai bună de $\pm 0,005\%$) și este determinată de eroarea de cuantificare și de erorile CN/A , comparatorului și sursei de tensiune etalon. Timpul de digitizare este de cca. 1 ms și deci viteza de măsurare este de 1000 rezultate numerice/s. Viteza de măsurare poate scădea până la 100 rezultate/s în cazul utilizării unor filtre pentru rejectia zgomotelor.

2. *Voltmetrele numerice cu tensiunea crescatoare în trepte.* Sunt voltmetre care funcționează tot pe baza metodei comparației, cu deosebirea că tensiunea de referință furnizată de sursa etalon este o tensiune mereu crescătoare, în trepte, de nivel constant. Schema bloc a unui voltmetru numeric cu tensiunea crescătoare, în trepte, este prezentată în figura 7.18, iar schema de detaliu în figura 7.19.

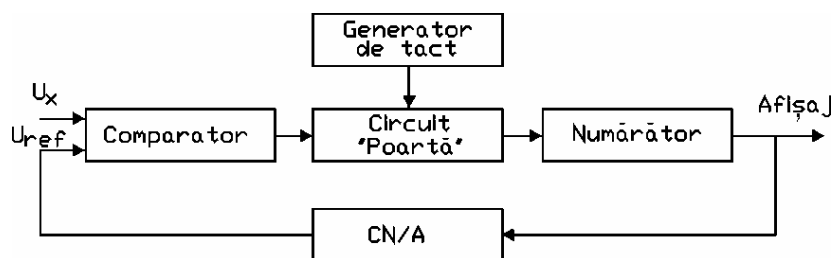


Fig. 7.18

Comparatorul furnizează la ieșire un semnal "1" când tensiunea de măsurat U_x este mai mare decât tensiunea de referință U_{ref} de la ieșirea convertorului analog-numeric (CN/A). Acest semnal deschide circuitul "poartă" care va permite trecerea spre numărator a impulsurilor generate de generatorul de tact. Numărătorul binar (cu cinci unități binare) numără impulsurile aplicate, iar combinațiile de "1" și "0" de la ieșire se aplică prin intermediul comutatoarelor de nivel $CN_1, \dots, CN_5$ rețelei de codificare la ieșirea careia se va obține o tensiune crescătoare în trepte (U_{ref}).

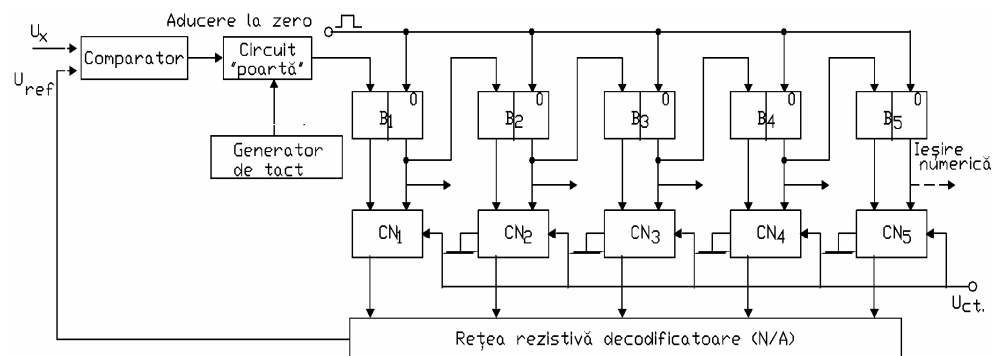


Fig. 7.19

Când se realizează condiția $U_{ref} > U_x$, comparatorul va furniza la ieșire semnal "0", circuitul poartă blochează trecerea impulsurilor de tact și se oprește numărarea. Tensiunea necunoscută U_x va fi egală cu numărul binar de la ieșirea număratorului.

Forma de undă a tensiunilor în diferitele puncte ale circuitului este vizualizată în figura 7.20.

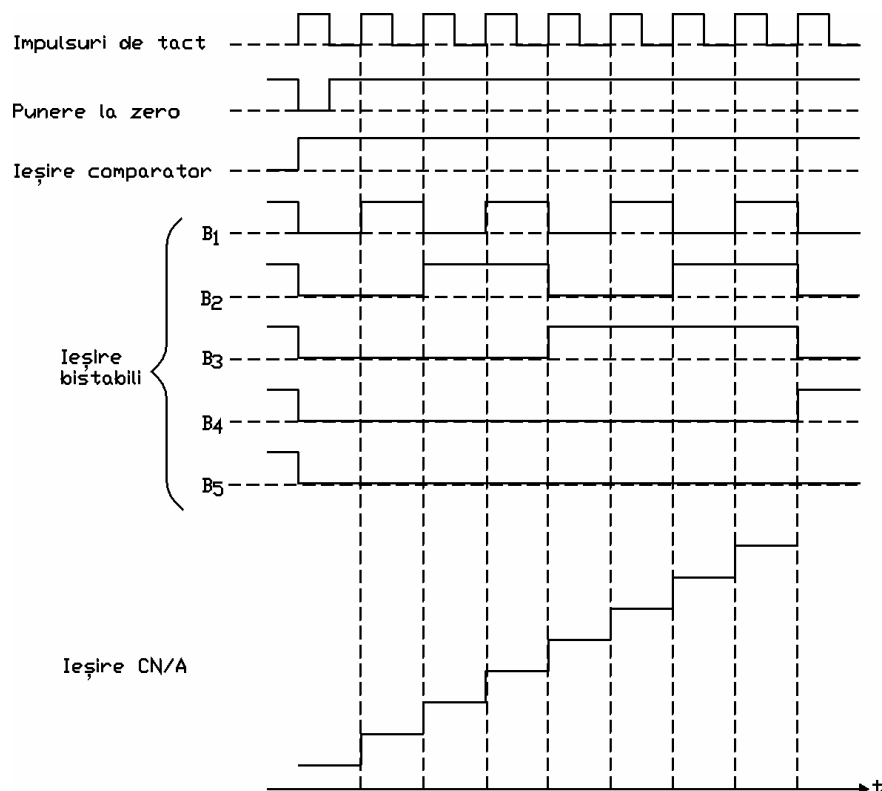


Fig. 7.20

Voltmetre numerice cu conversie tensiune/timp. Functionarea acestor voltmetre se bazează pe transformarea tensiunii continue de măsurat U_x , într-un interval de timp proporțional cu aceasta și în numărarea perioadelor unui semnal de frecvență etalon (generat de un oscilator etalon) care au loc în acest interval de timp. După modul în care se realizează conversia tensiune/timp, s-au realizat :

- 1) voltmetre cu tensiunea de comparație liniar-crescătoare;
- 2) voltmetre cu integrare dubla-panta.

1. *Voltmetrele cu tensiune de comparație liniar-crescătoare (rampa)* au schema bloc prezentată în figura 7.21 și cuprinde: un circuit de pornire, un generator de tensiune liniar variabilă (rampă – bază de timp), un comparator de intrare, un oscilator de frecvență etalon, un bloc logic și de comandă, un circuit poartă și o unitate de numărare, memorie și afișare.

Un impuls de pornire (furnizat de circuitul de pornire) realizează pornirea bazei de timp, deschiderea circuitului poartă și anularea conținutului număratorului. Comparatorul compară tensiunea de măsurat U_x cu tensiunea liniar crescătoare de la ieșirea generatorului de tensiune liniar variabilă U_{GTLV} :

$$U_{GTLV} = k(t - t_0).$$

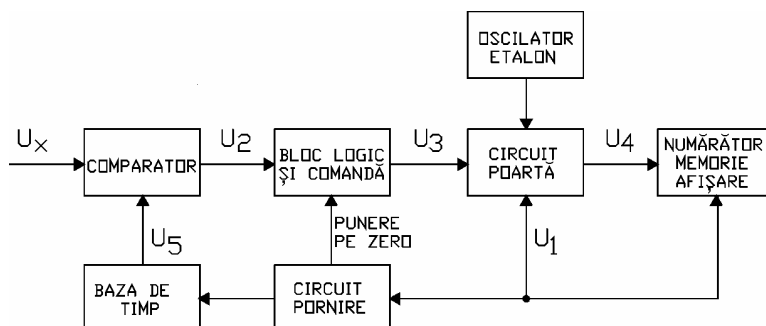


Fig. 7.21

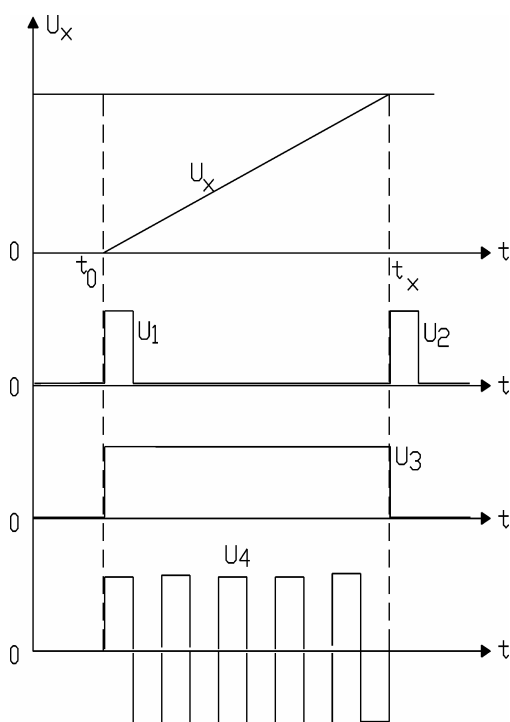


Fig. 7.22

Atâta timp cât $U_x > U_{GTLV}$, prin circuitul poartă vor trece către numărător impulsurile de frecvență f date de oscilatorul etalon. După un timp t_x , când tensiunea bazei de timp devine egală cu tensiunea de măsurat, comparatorul da un impuls care comandă (prin blocul logic și de comandă) închiderea porții și împiedicarea trecerii impulsurilor spre numărător:

$$U_x = U_{GTLV},$$

$$U_x = k(t_x - t_0) \text{ sau } t_x - t_0 = U_x / k.$$

Dacă $T=1/f$ este perioada impulsurilor, în intervalul de timp $t_x - t_0$ au trecut spre numărător prin circuitul poartă N impulsuri:

$$N = \frac{t_x - t_0}{T} = \frac{U_x}{kT} = kU_x.$$

Asadar, numărul de impulsuri numărate în acest interval de timp este proporțional cu valoarea tensiunii de măsurat.

În figura 7.22 sunt prezentate formele de variație ale tensiunilor în diferite puncte ale schemei din figura 7.21.

Datorită simplității construcției, voltmetrele de acest tip au un pret scăzut. Viteza de măsurare redusă, sensibilitatea mare față de semnalele parazite cât și precizia relativ modestă (0,1-1 %) recomandă însă utilizarea acestor aparate ca aparate de tablou și ca multimetre de lucru. Pe lângă erorile de cuantificare, în funcționarea acestor voltmetre mai intervin erorile datorate circuitelor electronice care le compun:

- inconstanța sursei de alimentare;
- instabilitatea frecvenței oscilatorului etalon;

- inconstanta pantei semnalului furnizat de generatorul de tensiune liniar variabila (baza de timp);
- tensiunea de “offset” a comparatoarelor.

2. *Voltmetrele numerice cu integrare cu dubla panta* functioneaza tot pe baza principiului conversiei semnalelor analogice de c. c. în timp, dar modul în care se realizeaza aceasta conversie difera de conversia tensiune-timp întâlnita la voltmetrul digital cu rampa liniara.

Aici, conversia tensiune-timp se realizeaza în doua faze. În prima faza se integreaza semnalul de masurat U_x , într-un interval de timp t_1 , iar în etapa a doua se integreaza o tensiune de referinta de polaritate inversa ($-U_{ref}$).

Schema bloc a voltmetrului digital cu integrare cu dubla panta este prezentata în figura 7.23, iar variatia tensiunilor în diferite puncte ale schemei în figura 7.24. La momentul initial, comutatorul K este pozitionat pe pozitia 1 astfel încât la intrarea amplificatorului operational se aplica tensiunea de masurat U_x . Ea va fi integrata într-un interval de timp determinat t_1 . Variatia de tensiune la iesirea integratorului la sfârșitul intervalului de timp t_1 va fi:

$$\Delta U_{t_1} = \frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_x dt = \frac{U_x \cdot t_1}{RC}.$$

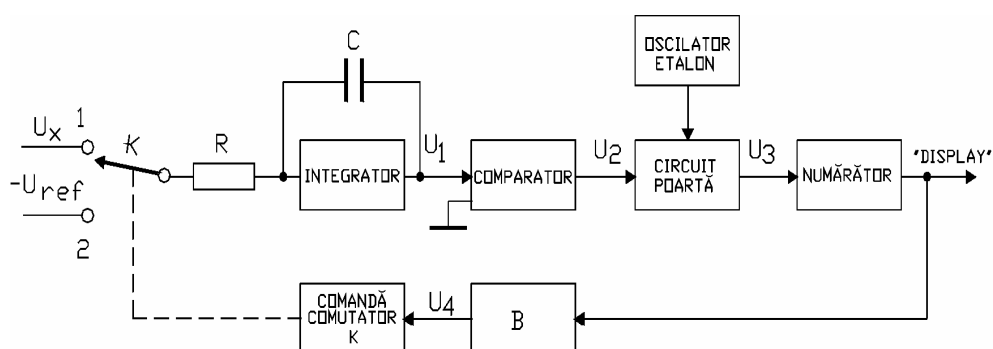


Fig. 7.23

Când tensiunea de la iesirea integratorului depaseste potentialul masei, comparatorul comanda deschiderea circuitului poarta P , astfel ca impulsurile generate de oscilatorul etalon vor trece catre numarator si vor fi numarate în intervalul de timp t_1 . Timpul t_1 a fost stabilit astfel încât în acest interval de timp, toate celulele numaratorului sa ajunga la valoarea “1”:

$$t_1 = \frac{N_{max}}{f_0} = N_{max} T_0,$$

unde: N_{max} este capacitatea maxima a numaratorului, iar f_0 (respectiv T_0) frecventa (respectiv perioada) impulsurilor oscilatorului.

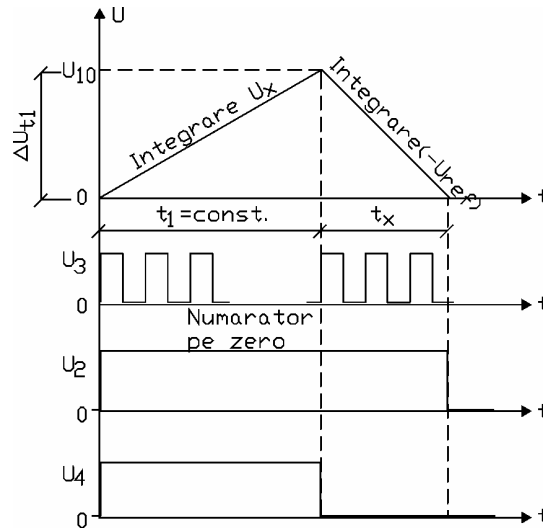


Fig. 7.24

Primul impuls sosit la oscilator dupa expirarea timpului t_1 , pune toate celulele pe "0", iar bistabilul B trece în starea "1" si comanda comutarea lui K de pe pozitia 1 pe pozitia 2. În acest moment, la intrarea integratorului se va aplica o tensiune de referinta de polaritate inversa, $(-U_{ref})$, iar la iesirea acestuia tensiunea va descreste liniar catre zero. În intervalul de timp în care $U_1 > 0$, poarta P este deschisa, iar impulsurile oscilatorului sunt numarate de catre numarator. Când $U_1 = 0$, poarta P se închide, astfel ca impulsurile numarate (N) sunt proportionale cu timpul de integrare t_x , care, la rândul sau este proportional cu valoarea tensiunii de la care a început integrarea inversa:

$$\Delta U_{t_x} = \frac{1}{RC} \int_0^{t_{x1}} (-U_{ref}) dt = \frac{-U_{ref} \cdot t_x}{RC} = \frac{-U_{ref} \cdot N}{RC f_0} = \frac{-U_{ref} \cdot N T_0}{RC}.$$

Variatiile de tensiune U_{t1} si U_{tx} sunt egale si opuse, adica:

$$\Delta U_{t1} = -\Delta U_{t_x},$$

$$\frac{U_x \cdot t_1}{RC} = \frac{U_{ref} \cdot t_x}{RC},$$

adica :

$$U_x N_{max} T_0 = U_{ref} N T_0,$$

$$U_x = (N/N_{max}) U_{ref}.$$

În relatia de mai sus se constata ca tensiunea de masurat U_x este direct proportionala cu tensiunea de referinta (U_{ref}), iar valoarea maxima a tensiunii de masurat este egala cu tensiunea sursei de referinta (pentru $N = N_{max}$).

Precizia acestor voltmetre este buna ($\pm 0,01 \% \div \pm 0,1 \%$ din domeniul de masurare), fiind independenta de frecventa oscilatorului. Ea este determinata de erorile circuitului integrator, ale comparatorului, tensiunii de referinta si circuitelor de comutatie.

Voltmetre digitale cu conversie tensiune-frecventa. Aceste aparate realizeaza masurarea tensiunii continue prin conversia ei într-un semnal periodic a carui frecventa este proportionala cu valoarea marimii masurate. Schema bloc a unui voltmetru numeric cu conversie tensiune-frecventa este prezentata în figura 7.25,a, iar diagramele de variatie ale semnalelor în diferite puncte ale schemei sunt prezentate în figura 7.25,b.

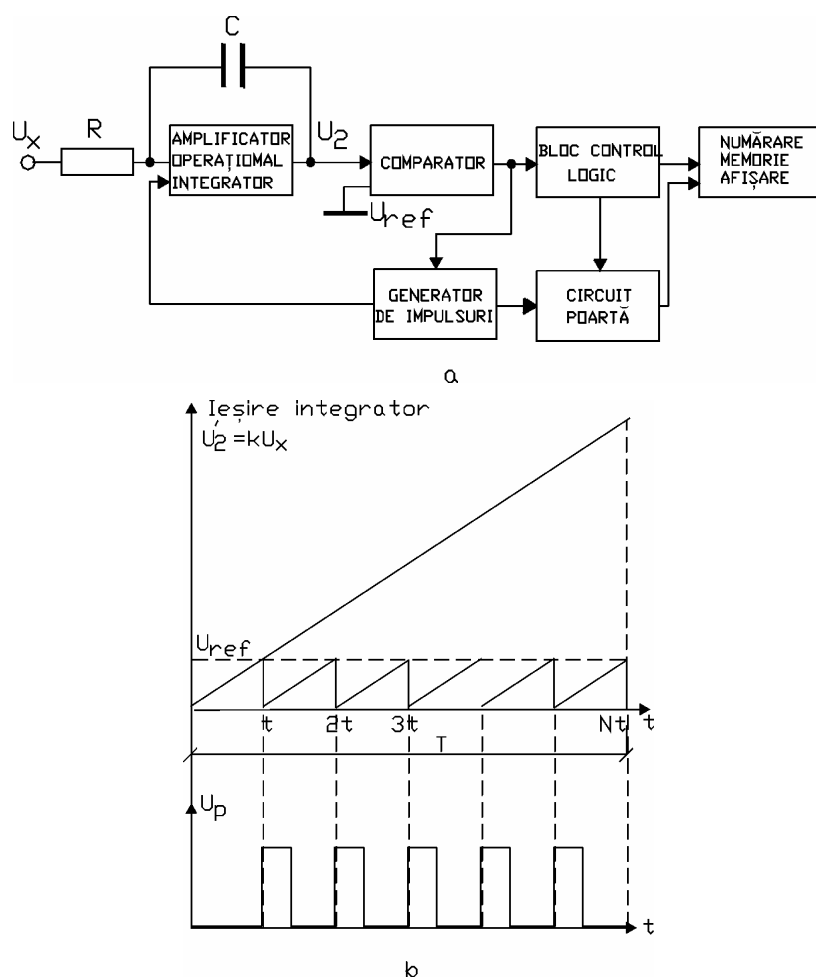


Fig. 7.25

Când la intrarea amplificatorului operational integrator se aplica tensiunea de masurat U_x , la iesirea acestora se obtine o tensiune liniar-variabila U_2 . La realizarea conditiei $U_2 = U_{ref}$, comparatorul își schimba starea si comanda intrarea în functiune a generatorului de impulsuri. Acesta va furniza la iesire un impuls care se

transmite pe de o parte la intrarea amplificatorului si prin care se realizeaza aducerea la zero a tensiunii la iesirea acestuia, iar pe de alta parte – prin circuitul poarta (a carui deschidere a fost comandata de catre blocul de control logic în momentul realizarii conditiei $U_2 = U_{ref}$) – activeaza circuitul de numarare, memorare si afisare. Operatia de integrare se reia astfel ca la iesirea integratorului se va obtine o tensiune în dinti de ferastrau, iar la intrarea numaratorului o succesiune de impulsuri a caror frecventa este proportionala cu tensiunea aplicata U_x .

La sfârșitul duratei prestabilite (T) de deschidere a portii, informatia stocata în numarator este transmisa dispozitivului de afisare.

Se poate stabili simplu proportionalitatea dintre numarul impulsurilor totalizate de numarator si tensiunea U_x de masurat. Tensiunea U_2 la iesirea integratorului este :

$$-U_2 = + \int_0^t \frac{U_x dt}{RC} = + \frac{U_x}{RC} t = U_{ref} \rightarrow (U_2 + U_{ref} = 0).$$

Daca integratorul nu ar fi readus ciclic la 0, tensiunea pe durata T de acces a impulsurilor catre numarator ar fi :

$$-U'_2 = + \int_0^T \frac{U_x dt}{RC} = + \frac{U_x T}{RC}.$$

Dar circuitul integrator este adus la 0 ori de câte ori tensiunea la iesirea acestuia are valoarea $U_2 = -U_{ref}$, deci numarul de impulsuri N va fi :

$$N = \frac{U'_2}{U_2} = \frac{U'_2}{-U_{ref}} = \frac{T}{RCU_{ref}} U_x = KU_x.$$

Voltmetre numerice cu conversii combinate. O îmbunatatire considerabila a performantelor masurarii (precizie, viteza de masurare, rejectia zgomotelor) se poate obtine prin combinarea principiilor de conversie precizate anterior.

Astfel, **voltmetrul numeric cu integrare-comparare** (a carui schema bloc este prezentata în figura 7.26) combina principiul comparatiei, care ofera avantajul unei precizii ridicate, cu principiul conversiei tensiune-frecventa care realizeaza o buna rejectie a zgomotelor.

Initial, comutatorul k este conectat pe pozitia 1 iar tensiunea de masurat U_x se aplica convertorului tensiune-frecventa cu integrator. Acesta va genera, într-un interval de timp fix comandat de baza de timp, o succesiune de impulsuri care sunt transmise unui numarator cu 6 ranguri care își va completa primele patru ranguri. La trecerea comutatorului k pe pozitia 2 iesirea numaratorului este aplicata – prin intermediul convertorului N/A – unui etaj comparator. Diferenta ($\pm e$) a celor doua tensiuni va fi aplicata convertorului tensiune-frecventa, iar impulsurile de la iesirea acestuia vor realiza completarea rangurilor 5 si 6 ale numaratorului (eventual corectarea rangului 4 daca este cazul). Acest numar este transmis dispozitivului de afisaj.

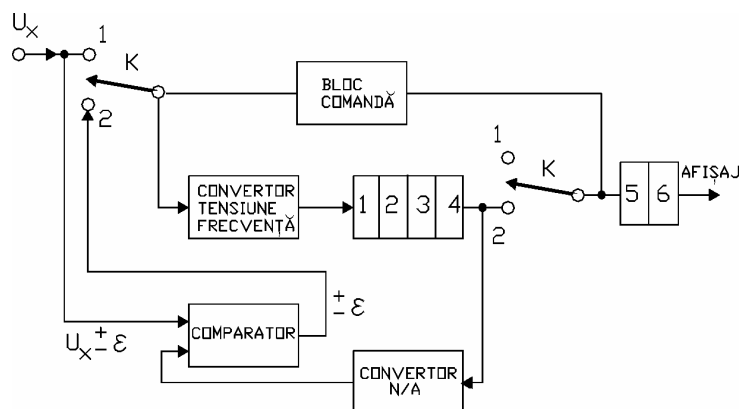


Fig. 7.26

Prin asocierea celor doua tipuri de conversii se realizeaza o crestere considerabila a preciziei (de 0,3 % în prima etapa, la 0,002 % în etapa a II-a), însoțita de o buna rejectie a zgomotelor.

Un alt tip de voltmetru numeric cu conversii combinate îl reprezintă **voltmetrul cu interpolare-integrare**. Acest voltmetru, a carui schema bloc este prezentată în figura 7.27, combina principiul conversiei tensiune – frecvența cu principiul conversiei tensiune – timp (integrării cu dubla poartă).

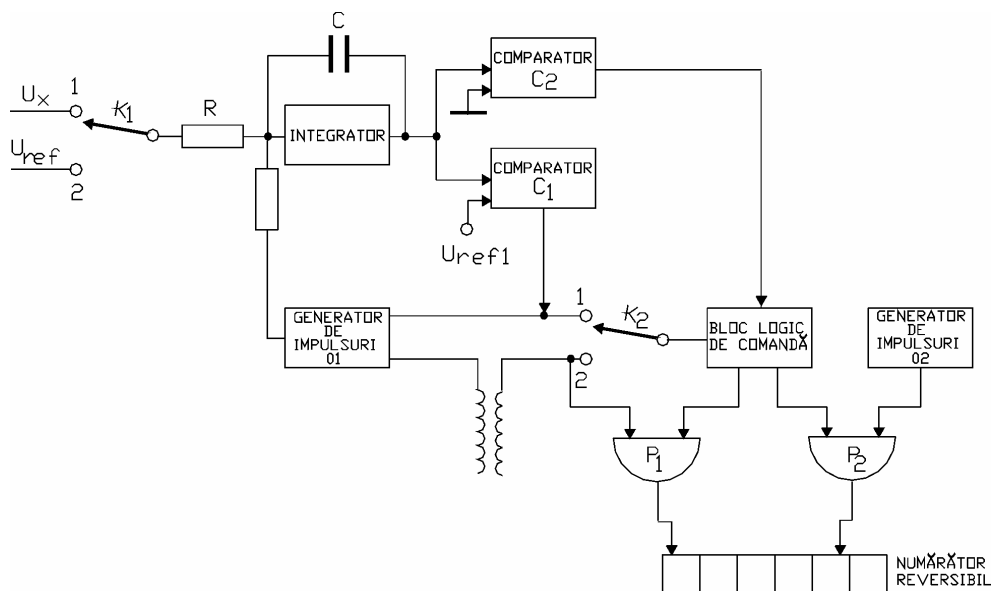


Fig. 7.27

În prima etapa, comutatoarele k_1 și k_2 sunt poziționate pe poziția 1, iar aparatul realizează o conversie tensiune – frecvență. Semnalul de frecvență f_x proporțional cu tensiunea de măsurat U_x trece prin poarta P_1 spre numărator

completând primele 4 ranguri ale acestuia. În acest interval de timp T (de regula $T = 20$ ms) condensatorul C al integratorului se încarcă până la o anumită valoare.

Când comutatoarele k_1 și k_2 trec pe poziția 2, începe conversia dubla poanta. La intrarea integratorului se aplică o tensiune de referință U_{ref2} de semn contrar lui U_x , ceea ce determină descarcarea condensatorului C până la valoarea 0. În tot acest interval de timp, prin poarta P_2 trec impulsurile de frecvență stabilă ale oscilatorului O_2 care completează ultimele două ranguri ale număratorului reversibil. La anularea semnalului de la ieșirea integratorului, blocul logic și de comandă determină închiderea porții P_2 și măsurarea este finalizată.

Acest voltmetru reunește avantajul voltmetrului cu integrare cu dubla pantă (viteza de măsurare ridicată), cu avantajul voltmetrului cu conversie tensiune-frecvență (bună rejecție a zgomotului).

7. 2. MASURAREA TENSIUNII ALTERNATIVE

Marimile periodice $y = y(t + kT)$ în general și marimile sinusoidale $y = Y_{max} \sin(\omega t + \varphi)$ în particular sunt caracterizate prin mai multe valori: valoarea instantanee, amplitudinea, valoarea efectivă și valoarea medie. Valoarea care interesează în măsurări este valoarea efectivă a tensiunii alternative, definită ca fiind tensiunea echivalentă cu valoarea unei tensiuni continue care determină dezvoltarea (în același interval de timp) unei aceiași cantități de căldură într-o sarcină rezistivă.

Dacă $u(t)$ este valoarea instantanee a tensiunii la bornele unei surse sau ale unui receptor, valoarea efectivă, notată cu U_{ef} sau simplu U , este dată de relația:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt},$$

în care T este perioada semnalului.

Pentru: $u = U_{max} \sin(\omega t + \varphi)$, rezulta:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{max}^2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}};$$

deci:

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 0,707 U_{max}.$$

Valoarea medie (U_{med}) a unei tensiuni sinusoidale pe un numar întreg de perioade (nT) data de relatia:

$$U_{med} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} u(t) dt = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} U_{max} \sin(\omega t + \varphi) dt$$

este nula, iar valoarea medie pe o semiperioada (a unei semialternante) va fi:

$$U_{meds} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{max} \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{2}{\pi} U_{max} = 0,636 U_{max}.$$

Raportul: U_{ef}/U_{meds} stabileste relatia de legatura între cele 2 valori:

$$\frac{U_{ef}}{U_{meds}} = \frac{0,707 U_{max}}{0,636 U_{max}} = 1,11.$$

Obtinerea informatiilor privind valorile efective ale tensiunilor alternative se poate realiza fie prin utilizarea unor voltmetre de valori efective, fie prin utilizarea unor voltmetre magnetoelectrice sau electronice de c.c. conectate la iesirea unor dispozitive de detectie (redresoare, termoelemente) capabile sa transforme semnalul alternativ într-un semnal continuu, proportional cu acesta.

7.2.1. Voltmetre de valori efective

Voltmetrul electromagnetic (feromagnetic). Functionarea dispozitivelor electromagnetice se bazeaza pe fortele de interactiune dintre câmpul magnetic produs de o bobina fixa parcursa de curentul ce se masoara (sau un curent proportional cu tensiunea masurata) si una sau mai multe piese feromagnetice aflate în acest câmp.

Cuplul activ M_a , determinat de aceste forte, actioneaza asupra pieselor feromagnetice, determinând deplasarea acestora în zona de câmp magnetic maxim si modificarea energiei magnetice a sistemului.

În figura 7.28 este prezentat un dispozitiv electromagnetic cu repulsie utilizat în realizarea unor aparate de tablou.

Bobina fixa 1, în forma cilindrica, este parcursa de curentul i si creeaza un câmp magnetic de inductie B . În interiorul acesteia se afla piesele feromagnetice 2 – fixata de interiorul carcasei bobinei si 3 – solidara cu axul 4 al sistemului mobil, care se vor magnetiza în acest fel.

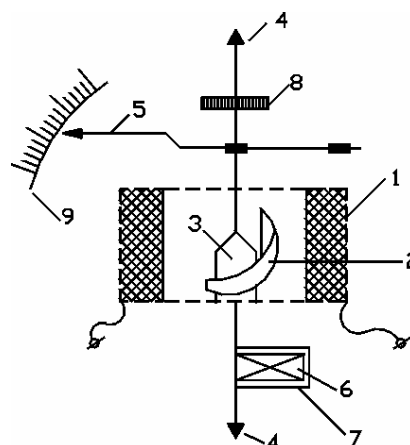


Fig. 7.28

Fortele de respingere dintre cele doua piese vor determina cuplul activ M_a care va pune în miscare axul sistemului mobil si odata cu acesta acul indicator 5 si paleta 6 a dispozitivului de amortizare pneumatic 7.

Daca L este inductivitatea bobinei si i este valoarea instantanee a curentului alternativ cu perioada T , $i = i(t + kT)$, care o strabate, energia câmpului magnetic al bobinei (W_{em}) va fi:

$$W_{em} = \frac{1}{2} L \cdot i^2 .$$

Aplicând teorema fortelor generalizate, vom obtine expresia cuplului activ instantaneu:

$$M_{a\ inst} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha} .$$

Datorita inertiei sistemului mobil, acesta se va deplasa sub actiunea unui cuplu activ mediu.

$$M_{a\ med} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{a\ inst} dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i(t + kT) dt = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} ,$$

în care I este valoarea efectiva a curentului alternativ din bobina.

Cuplului activ mediu $M_{a\ med}$ i se opune cuplul rezistent M_r determinat de resorturile spirale 8 (v. fig. 7. 28) si a carui valoare este proportionala cu unghiul de derivatie α :

$$M_r = -D\alpha ,$$

în care D este cuplul rezistent specific.

La echilibru, $M_{a\ med} = M_r$ adica:

$$\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} = D\alpha ; \alpha = \frac{1}{2D} I^2 \frac{dL}{d\alpha} . \quad (7.3)$$

Existenta factorului I^2 în relatia (7.3) evidentiaza faptul ca scara 9 a dispozitivului electromagnetic este patratica, cu diviziuni mai apropiate la început si mai departate spre capatul acesteia. Printr-o alegere adecvata a formei pieselor feromagnetice si a pozitiei initiale a acestora, se poate obtine o variatie a factorului dL/da care sa compenseze într-o buna masura aceasta neliniaritate.

Voltmetrele electromagnetice se construiesc ca aparate de tablou cu clasa de precizie 1,5 sau 2,5, sau ca aparate portabile (de laborator) cu clasa de precizie 0,5 sau 0,1. În cazul constructiei acestora ca aparate de laborator, suspensia se realizeaza pe benzi tensionate, amortizarea este electromagnetica, iar în locul acului indicator se foloseste o oglinda pentru dispozitivul optic de citire a deviatiei.

Domeniul de frecvente al aparatelor electromagnetice este cel al frecventelor industriale (45-65 Hz), cu posibilitati de extindere pâna la 200 Hz, domeniul de

masurare este cuprins între 15 si 600 V, iar consumul propriu (destul de ridicat) variaza între 3 si 20 VA. Pentru masurarea tensiunilor alternative mai mari de 600 V se utilizeaza voltmetre cu domeniul de masurare 100 V conectate în secundarul unor transformatoare de tensiune.

Principalele surse de erori ale voltmetrelor electromagnetice sunt:

- variatiile de temperatura;
- existenta unor câmpuri magnetice;
- fenomenul de histerezis magnetic si curentii turbionari;
- frecventa si forma de unda a semnalelor.

În principiu, voltmetrele electromagnetice pot fi utilizate si în c.c. unde sunt însa preferate aparate magnetoelectrice caracterizate prin precizii mai ridicate si consumuri proprii reduse.

Voltmetrele electrodinamice. Constructia, functionarea si performantele au fost studiate într-un paragraf anterior (v. § 7.1.2 si fig. 7.12). Ele se utilizeaza si pentru masurarea tensiunilor alternative de frecvente 40-60 Hz, cu precizarea ca, în acest caz, deplasarea sistemului mobil se realizeaza sub actiunea valorii medii a cuplului activ $M_{a\ med}$ data de relatia:

$$M_{a\ med} \frac{1}{T} \int_0^T M_{a\ inst} dt = \frac{dL_{12}}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt ,$$

în care: $M_{a\ inst} = i_1 \cdot i_2 \frac{dL_{12}}{d\alpha}$ este valoarea instantanee a cuplului activ; i_1, i_2 – valorile instantanee ale curentilor prin cele doua bobine; T – perioada de variatie a cuplului activ instantaneu; L_{12} – inductivitatea mutuala a celor doua bobine.

Daca I_1 si I_2 sunt valorile efective ale celor doi curenti (presupusi sinusoidali si de aceeasi frecventa), iar j este unghiul de defazaj dintre cei doi curenti, pentru cuplul activ mediu se va obtine expresia :

$$M_{a\ med} = I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dL_{12}}{d\alpha} .$$

La echilibrul cuplului activ mediu cu cuplul rezistent: $M_r = - D\alpha$ (dat de elemente clasice) se va obtine:

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \cos (\underline{I}_1, \underline{I}_2) \frac{dL_{12}}{d\alpha} = k I_1 I_2 \cos (\underline{I}_1, \underline{I}_2) \frac{dL_{12}}{d\alpha}$$

unde $\varphi = (\underline{I}_1, \underline{I}_2)$ si D este cuplul rezistent specific.

Schema electrica a unui voltmetru electrodinamic cu 3 domenii de masurare este prezentata în figura 7. 29. Ea cuprinde bobinele fixe 1 si 1' înseriate cu bobina mobila 2 si cu rezistentele aditionale Ra_1 , Ra_2 , Ra_3 si un condensator C , în paralel cu o parte din rezistenta aditionala Ra_1 , a carei functie este de a permite extinderea domeniului de frecvente de utilizare pâna la 1-2 kHz.

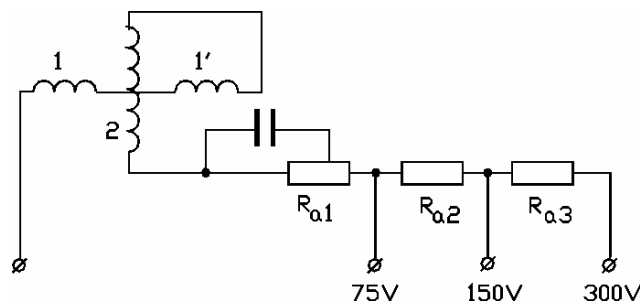


Fig. 7. 29

Voltmetrele electrostatice. Au fost prezentate în paragraful 7.1.3 (v. fig. 7.13 și fig. 7.14). Ele pot funcționa și în curent alternativ unde deviația α a sistemului mobil va fi proporțională cu valoarea efectivă a tensiunii (indiferent de forma curbei de tensiune).

De asemenea, funcționarea în curent alternativ a voltmetrelor electrostatice nu este influențată de valoarea frecvenței, până la frecvențe de ordinul MHz.

Voltmetrele cu termocuplu. Sunt voltmetre de tip termoelectric alcătuite din unul sau mai multe dispozitive termoelectrice de tip termocuplu și un instrument de măsurat magnetoelectric. Funcționarea acestora se bazează pe tensiunea termoelectromotoare E_q care apare la capetele “reci” ale unui termocuplu, atunci când capetele sudate (“calde”) ale acestuia sunt încălzite de efectul termic al curentului electric de măsurat, trecut printr-un fir încălzitor (filament). Tensiunea termoelectromotoare E_q – care este o tensiune continuă ce se măsoară cu ajutorul unui milivoltmetru magnetoelectric – depinde de diferența de temperatură $\Delta\theta$ existentă între capetele sudate și capetele reci ale termocuplului. Pe anumite intervale de variație a temperaturii, dependența $E_\theta = f(\theta)$ este liniară:

$$E_\theta = k_1 \Delta\theta,$$

unde k_1 este o constantă constructivă a termocuplului.

Deoarece: $\Delta\theta = k_2 RI^2 = k_2 RU^2/R^2$ rezultă:

$$E_\theta = k_1 k_2 U^2 = k U^2,$$

relații în care: R este rezistența firului încălzitor, I – valoarea efectivă a curentului ce străbate firul încălzitor și U – valoarea efectivă a tensiunii măsurate.

Dacă S_u este sensibilitatea de tensiune a milivoltmetrului, deviația α a acestuia va fi de forma:

$$\alpha = S_u E_q = S_u k U^2;$$

deci, scara aparatului este patratică.

Câteva tipuri de termocupluri folosite ca elemente sensibile – convertoare (de detecție) ale voltmetrelor termoelectrice sunt prezentate în figura 7.30.

Voltmetrele termoelectrice au calitatea de a masura valorile efective ale tensiunilor alternative (chiar si distorsionate) pâna la frecvente relativ înalte dar au un consum propriu ridicat si o capacitate redusa de supraîncarcare.

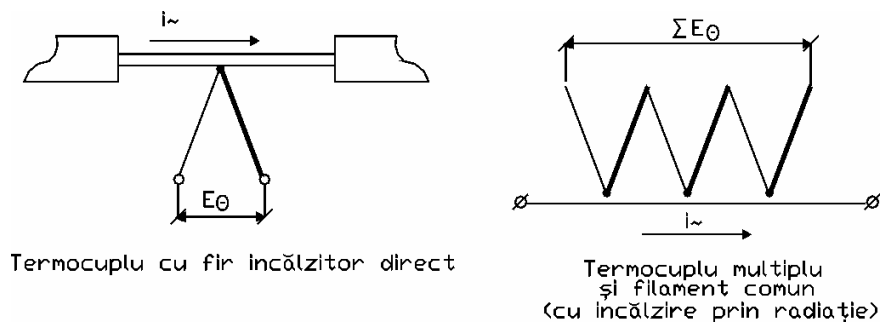


Fig. 7. 30

Ca surse posibile de eroare mentionam în special:

- neliniaritatea caracteristicii $E_{\theta} = f(\theta)$ a termocuplului;
- influenta temperaturii capetelor reci ale termocuplului asupra tensiunii E_{θ} .

În scopul evitarii efectului neliniaritatii termocuplului, acesta se introduce într-o schema de compensare care contine doua termoelemente identice conectate ca în figura 7.31.

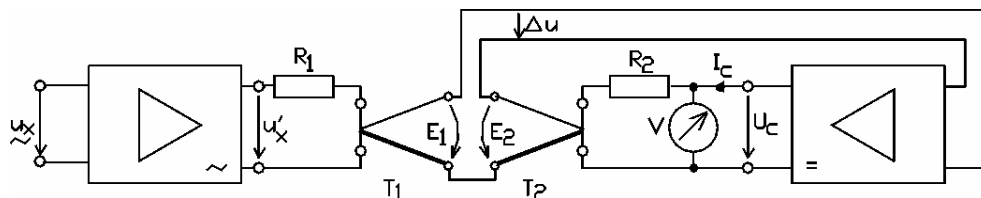


Fig. 7. 31

Fila mentele celor doua termoelemente sunt parcurse unul de curentul alternativ produs de tensiunea de masurat u_x , amplificata de un amplificator de c.a., iar celalalt, de un curent continuu produs de tensiunea de dezechilibru $\Delta U = E_1 - E_2$, amplificata de un amplificator de c.c.

La realizarea echilibrului $\Delta U = 0$, iar tensiunea U_c de la intrarea amplificatorului de c.c. masurata cu voltmetrul de c.c. V este egala cu valoarea efectiva U_x' a tensiunii u_x' proportionala cu tensiunea de masurat u_x :

$$U_c = U_x' = kU_x.$$

Voltmetrele cu termistoare. Sunt voltmetre de valori efective care utilizeaza ca instrument de masurat un dispozitiv magnetoelectric, iar ca element de detectie doua termistoare identice (încalzite în direct) conectate în doua laturi adiacente ale unei punti de c.c. (fig. 7.32).

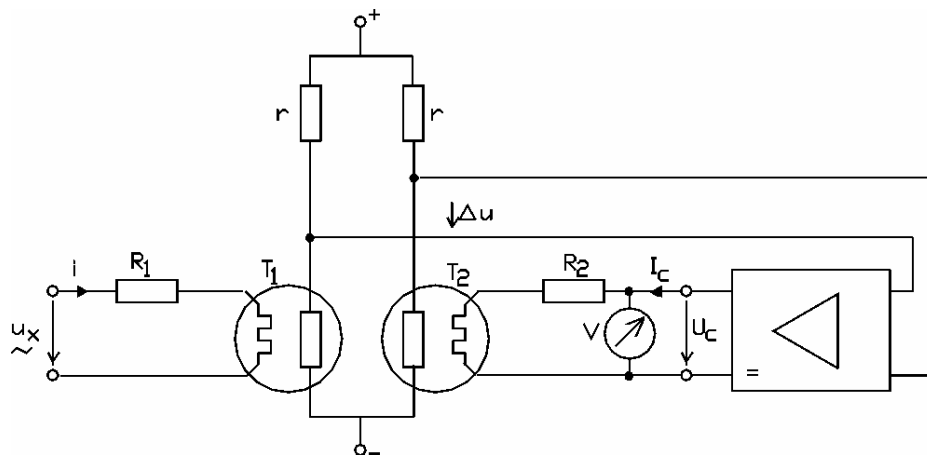


Fig. 7. 32

Unul din cele doua termistoare este încălzit de curentul alternativ i_x dat de tensiunea de masurat u_x , iar celalalt de un curent continuu I_c dat de tensiunea U_c de la iesirea unui amplificator de c.c. alimentat cu tensiunea ΔU de dezechilibru a puntii.

La echilibrul puntii, tensiunea U_c masurata de voltmetrul V este proportionala cu valoarea efectiva U_x a tensiunii de masurat.

Voltmetre cu detectoare patratiche cu diode. Aceste voltmetre utilizeaza, în scopul masurarii valorii efective a tensiunii, elemente de detectie cu caracteristica de transfer patratica ($X_e = kX_i^2$) si instrumente de masurat magnetoelectrice a caror scara este etalonata astfel încât indicatia sa reprezinte radacina patrata a tensiunii aplicate.

Ca elemente de detectie pot fi utilizate diodele semiconductoare ale caror caracteristici $I = f(U)$ prezinta, în cadranul 1 neliniaritati de ordinul doi ($I = kU^2$). Schema unui detector patratic cu diode este prezentata în figura 7.33.

Tensiunile de polarizare ale dispozitivelor semiconductoare (T_1 , D_1 si D_2) si elementele pasive ale circuitului (R_1 , R_2 , R_4 si R_5) sunt astfel alese încât pentru $U_1 = 0$ (U_1 – tensiunea de masurat), dioda D_2 este blocata, iar prin tranzistorul T_1 si dioda D_1 trece un curent de valoare redusa. La cresterea tensiunii U_1 va creste si tensiunea aplicata diodei D_1 astfel ca prin grupul serie R_1 , T_1 , D_1 , R_2 va circula un curent I proportional cu patrutul tensiunii U_1 (între punctele 1 si 2 ale caracteristicii de transfer din figura 7.33.). Tensiunea de iesire U_2 (masurata cu un voltmetru magnetoelectric) este proportionala cu curentul I , deci patrutul tensiunii U_1 :

$$U_2 = k_1 I = k_1 k_2 U_1^2.$$

Când tensiunea la bornele diodei D_1 depaseste o anumita valoare (corespunzatoare punctului 2 de pe caracteristica prezentata în figura 7.33), aceasta se blocheaza si intra în functiune dioda D_2 care va functiona pe portiunea initiala a caracteristicii sale.

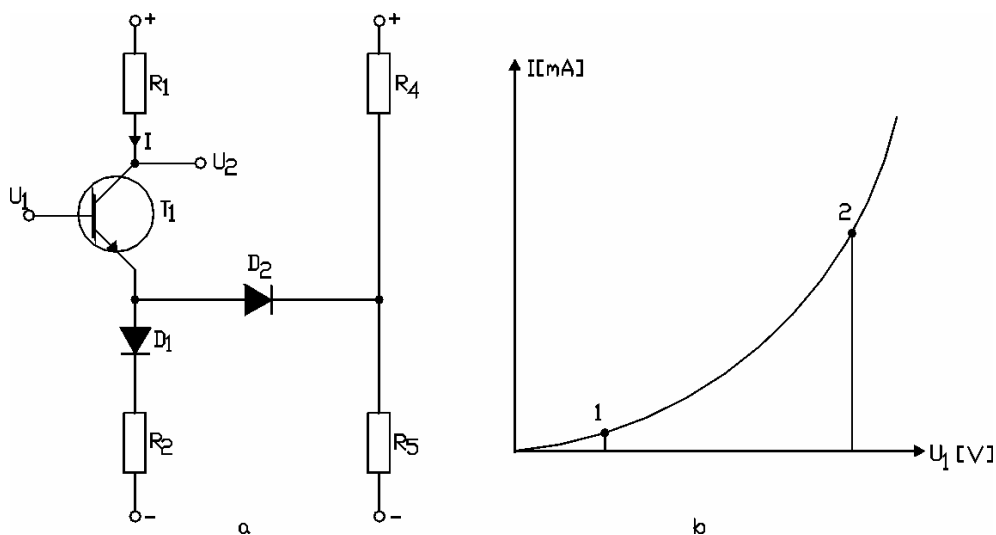


Fig. 7.33

Voltmetre magnetoelectrice cu redresor. Sunt voltmetre de curent continuu care permit masurarea tensiunilor alternative sinusoidale tinând seama de relatiile existente între valoarea efectiva si valorile medii sau maxime ale acestora.

Aceste voltmetre sunt alcatuite dintr-un cuadripol de adaptare ce contine sunturi si rezistoare aditionale, un redresor monofazat (mono sau bialternanta) si un dispozitiv magnetoelectric.

În figura 7.34 sunt prezentate doua scheme de redresoare monoalternanta, precum si formele de unda ale tensiunii si curentului din aceste circuite.

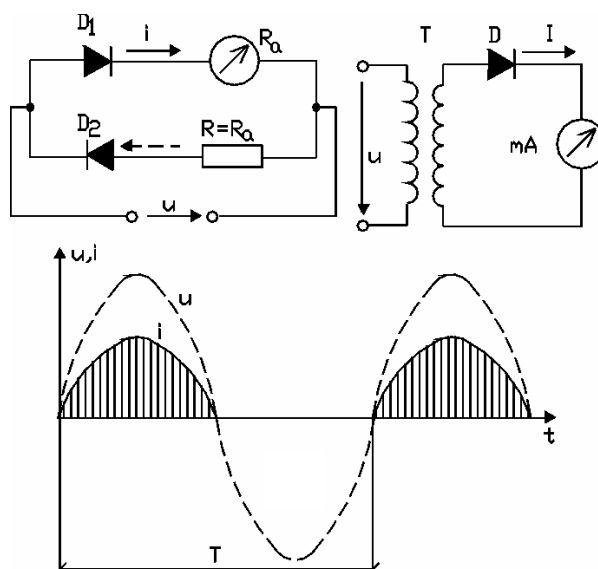


Fig. 7.34

Asupra sistemului mobil al dispozitivului de masurat va actiona un cuplu instantaneu dat de relatia:

$$M_{a\ inst} = \Phi_0 i = \Phi_0 \sqrt{2} I \sin \omega t.$$

Valoarea medie pe o perioada a cuplului activ va fi:

$$M_{a\ med} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \Phi_0 \sqrt{2} I \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2} F_0 I}{T} \frac{2}{?} = \frac{F_0 I}{2,22} = \frac{F_0 I}{2k_f} = \frac{1}{2} F_0 I_{med}$$

unde: $k_f = \frac{I}{I_{med} \left(\frac{T}{2} \right)} = 1,11$ este factorul de forma al curentului sinusoidal.

Daca $M_r = -D\alpha$ este cuplul rezistent, va rezulta pentru deviatia α :

$$\alpha = \frac{\Phi_0}{D} I_{med} = \frac{\Phi_0}{D} \frac{I}{2,22} = \frac{\Phi_0}{D} \frac{I}{2k_f} = k_1 U.$$

Diferite variante ale redresarii bialternanta (schemele de redresare si formele de unda asociate) sunt prezentate în figura 7.35.

În aceste cazuri deviatia α a sistemului mobil va fi:

$$\alpha = \frac{\Phi_0}{D} I_{med} = \frac{\Phi_0}{D} \frac{I}{1,11} = \frac{\Phi_0}{D} \frac{I}{k_f} = k_2 U.$$

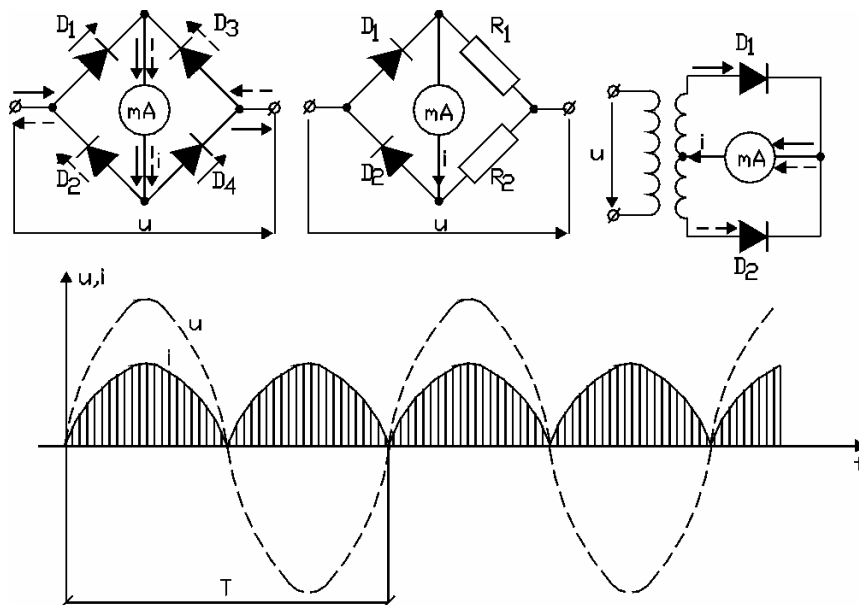


Fig. 7. 35

Voltmetrele a caror derivatie α este proportionala cu valoarea medie a curentului (respectiv tensiunii) se numesc *voltmetre de valori medii*. Datorita relatiei existente între valoarea medie si cea efectiva, etalonarea scarii acestora se poate realiza direct în valori efective.

În cazul masurarii tensiunilor de valori mici (de ordinul mV) redresorul este precedat de un amplificator de c.a. cu banda de trecere larga si câstigul foarte stabil.

Voltmetre de valori maxime (sau de vârf). Sunt alcatuite dintr-un detector de valori maxime si un voltmetru de tensiune continua. Ele permit masurarea valorilor efective ale tensiunilor alternative datorita relatiei existente între acestea si valorile maxime ($U_{ef} = 0,707U_{max}$).

Schemele de principiu (serie si derivatie) ale voltmetrelor de valori maxime ca si curbele de variatie a tensiunii pentru diferite constante de timp ($\tau = RC$) sunt prezentate în figura 7.36.

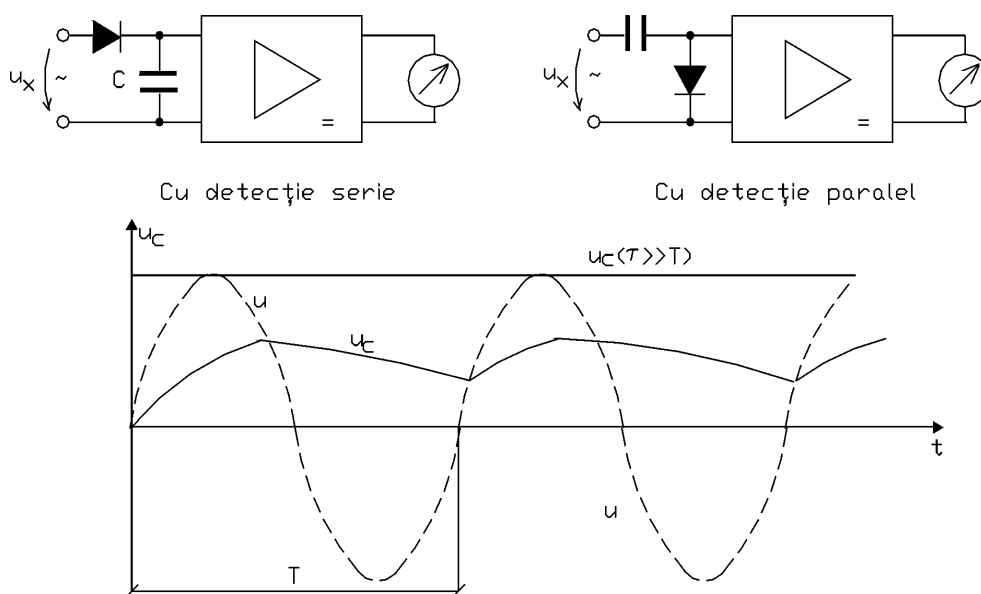


Fig. 7.36

Tensiunea alternativa sinusoidala de masurat, u_x , este convertita de un detector de valori maxime într-o tensiune pulsatorie. Pentru o anumita alternanta a tensiunii alternative, condensatorul C se va încarca prin dioda D până la valoarea maxima a tensiunii aplicate, descarcându-se foarte puțin în alternanta urmatoare pe rezistorul de rezistenta R .

Daca constanta de timp $\tau = RC$ a circuitului de descarcare este mult mai mare fata de perioada T a tensiunii de masurat u_x , tensiunea la bornele condensatorului –

si implicit tensiunea masurata de voltmetrul de tensiune continua – ramâne practic constanta si egala cu valoarea maxima $U_{x\max}$ a tensiunii de masurat.

Cum însa $\frac{U_{x\max}}{U_{x\text{ef}}} = k = \sqrt{2}$, rezulta ca valoarea efectiva a tensiunii masurate

se obtine prin împartirea la $\sqrt{2}$ a valorii maxime, astfel încât etalonarea scarii voltmetrelor analogice utilizate se poate face în valori efective (se presupune ca marimea de masurat este sinusoidala).

Îmbunatatirea sensibilitatii voltmetrului se poate obtine prin utilizarea unui amplificator de c.c. conectat la iesirea detectorului de valori maxime.

O varianta a detectiei de vârf o reprezinta detectia vârf la vârf care are o eficienta mai ridicata si elimina erorile datorate nesimetriei perfecte a semnale-

lor. În figura 7.37 este prezentata o schema simpla de detector la vârf (dublor de tensiune); în acest caz:

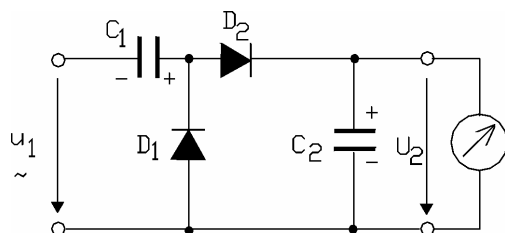


Fig. 7.37

$$U_{vv} = 2U_{\max} = 2\sqrt{2} U_{\text{ef}},$$

adica:

$$U_{\text{ef}} = \frac{U_{vv}}{2\sqrt{2}}$$

Pentru ca tensiunea la bornele condensatoarelor C_1 si C_2 sa ramâna constanta, este necesar ca valorile capacitatilor condensatoarelor sa fie suficient de mari (constante de timp $\tau \gg T$).

Voltmetrele de valori de vârf cu diode sunt singurele voltmetre care permit masurari ale semnalelor sinusoidale într-un domeniu foarte larg de frecvente (20 Hz – 500 MHz).

Voltmetre cu detectii combinate. Aceste aparate sunt voltmetre de valori efective care utilizeaza doua tipuri de detectoare: un detector de valori medii si un detector de valori maxime. Semnalele de la iesirea acestor detectoare se aplica la intrarea unui amplificator operational, ca în figura 7.38.

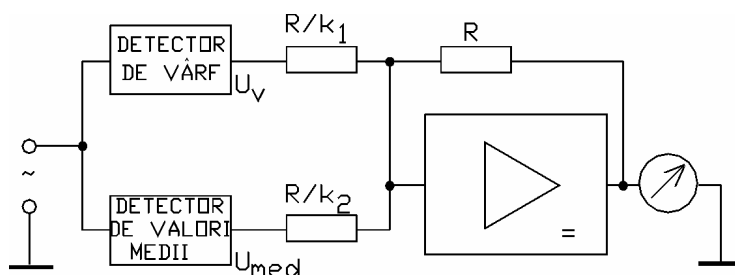


Fig. 7.38

Tensiunea continua obtinuta la iesirea amplificatorului si masurata cu un aparat magnetoelectric are doua componente

$$U_m = R \sum_1^2 \frac{U_i}{R_i} = R \left(\frac{U_{max}}{R/k_1} + \frac{U_{med}}{R/k_2} \right) = k_1 U_{max} + k_2 U_{med} .$$

Pentru o variatie sinusoidala a tensiunii de masurat u_x , coeficientii k_1 si k_2 au valorile : $k_1 = \frac{0,707}{2}$ si $k_2 = \frac{1,11}{2}$. În acest caz U_m devine:

$$U_{med} = \frac{0,707 U_{max}}{2} + \frac{1,11 U_{med}}{2} = \frac{U_{ef}}{2} + \frac{U_{ef}}{2} = U_{ef} .$$

7.2.2. Caracteristici si performante ale voltmetrelor cu detectie

1. *Influenta formei de unda asupra indicatiei voltmetrelor.* O sursa importanta de erori în masurarea tensiunilor alternative o constituie prezenta armonicelor de ordin superior care determina distorsionarea semnalelor. Din aceste considerente, în cazul realizarii unor masurari de precizie se vor alege voltmetre a caror indicatie este cel mai putin influentata de prezenta armonicelor.

Se stie ca gradul de distorsiune al unui semnal se apreciaza prin coeficientul de distorsiune δ , definit prin raportul dintre valoarea efectiva a reziduului deformant si valoarea efectiva a semnalului total:

$$\delta = \frac{U_{ef \text{ reziduu}}}{U_{ef \text{ semnal}}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2}} ;$$

iar daca semnalul $u(t + kT)$ este deformat, el va avea spectrul:

$$u(t + kT) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{maxk} \sin(k\omega t + \varphi_k) .$$

Cel mai putin influentate de prezenta armonicelor în unda de tensiune sunt voltmetrele cu termoelemente (termocupluri si termorezistente), deoarece elementele sensibile ale acestora sunt activate de caldura firelor încalzitoare care depinde direct de $U_{ef \text{ semnal}}$.

De asemenea, la voltmetrele care utilizeaza detectia patratica, valoarea indicata nu depinde de forma de unda, deoarece prin definitie:

$$\begin{aligned}
 U_{ef\ semnal}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t + kT) dt = \\
 &= \frac{1}{T} \int \left[\sum_{k=1}^n U_{max\ k} \sin(k\omega t + \varphi_k) \right]^2 dt = \\
 &= \frac{1}{T} \int \sum_{k=1}^n U_{max\ k}^2 \sin^2(k\omega t + \varphi_k) dt + \\
 &+ \frac{1}{T} \int \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n U_{max\ k} \sin(k\omega t + \varphi_k) \cdot U_{max\ j} \sin(j\omega t + \varphi_j) dt.
 \end{aligned}$$

Deoarece valoarea celui de-al doilea termen din suma de mai sus este nula, valoarea efectiva a semnalului va fi:

$$U_{ef\ semnal} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum u_k^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{efk}^2}.$$

O alta sursa de eroare (întâlnita însa doar la voltmetrele care masoara U_{vv}) se datoreaza nesimetriei semnalelor.

2. *Viteza de masurare si timpul de raspuns.* Viteza de masurare este calitatea aparatului de a urmări variatiile în timp ale mărimii măsurate. Ea este determinată de timpul de răspuns care reprezintă intervalul de timp scurs din momentul aplicării semnalului la intrarea voltmetrului până în momentul stabilizării indicației. Acesta are valori mai reduse (0,5-1 s) la voltmetrele de valori medii și de vârf și mai ridicate (până la 2-3 s) la voltmetrele cu termoelemente.

3. *Gama de frecventa.* Reprezintă domeniul frecvențelor tensiunilor măsurate cu un anumit tip de aparat în limitele unei precizii impuse. La voltmetrele cu amplificator de c.a. aceasta este determinată în principal de banda de frecvență a amplificatorului. Voltmetrele de valori efective și medii sunt în general prevăzute cu amplificatoare de banda largă care permit măsurarea tensiunilor cu frecvențe cuprinse între câțiva Hz și 10 MHz. Voltmetrele de valori maxime – la care detectia precede amplificarea – pot măsura tensiuni cu frecvențe de ordinul sutelor de MHz.

4. *Influenta zgomotelor.* În multe situații practice, măsurarea semnalelor se realizează în prezența zgomotului. Există două surse de zgomot: zgomotul intern – determinat de circuitele din interiorul aparatului, care este proporțional cu lărgimea de bandă a amplificatorului și zgomotul extern care însoțește semnalul util.

Ambele tipuri de zgomot au o influență negativă asupra calității măsurării (v. cap. 11).

7.2.3. Voltmetre cu esantionare

Pentru masurarea tensiunilor cu frecvente foarte mari (de ordinul GHz) se folosesc voltmetrele cu esantionare.

Dupa modul în care se realizeaza esantionarea, voltmetrele cu esantionare pot fi: *cu esantionare coerenta* sau *cu esantionare incoerenta*.

Esantionarea coerenta se utilizeaza atunci când se doreste pastrarea formei de unda a semnalului. Schema bloc a unui voltmetru cu esantionare coerenta, prezentata în figura 7.39, contine un bloc de esantionare la intrarea caruia se aplica semnalul de masurat u_x , (periodic, cu perioada T_x) si un tren de impulsuri de comanda de frecventa T_e ($T_e \gg T_x$) furnizate de un generator de impulsuri de esantionare:

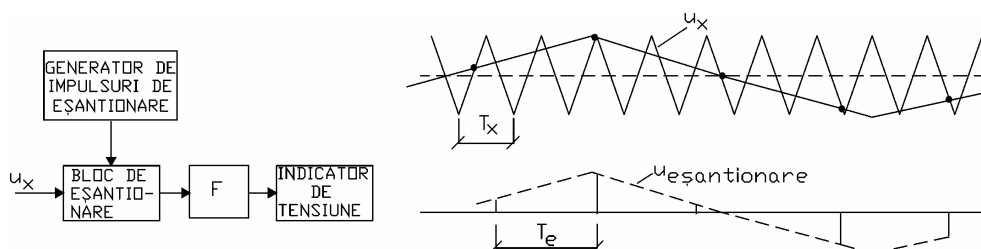


Fig. 7.39

Esantioanele de la iesirea blocului de esantionare se aplica la intrarea unui aparat indicator de tensiune (dupa trecerea lor printr-un filtru F). Functionarea blocului de esantionare se bazeaza pe încărcarea unui condensator până la valoarea de vârf a tensiunii de intrare, în anumite intervale de timp comandate de comutatorul K (fig. 7.40,a). În intervalul de timp dintre doua esantionari, condensatorul C nu se poate descarca, astfel ca tensiunea la bornele sale reproduce (la o alta scara) forma tensiunii de la intrare (fig. 7.40,b).

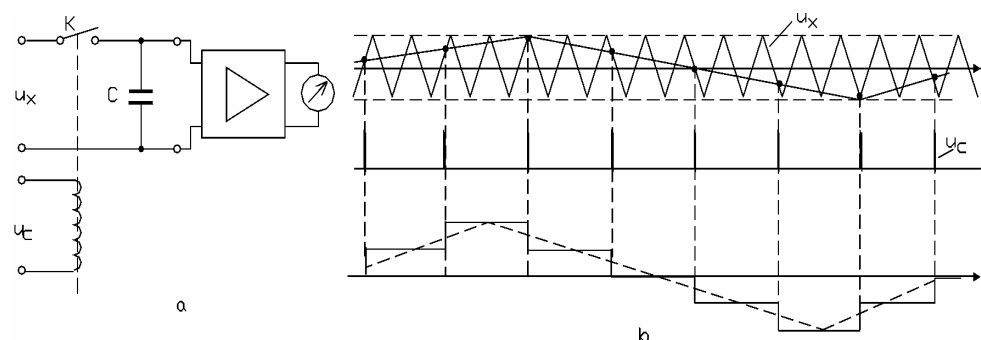


Fig. 7.40

Daca nu se urmareste si pastrarea formei semnalului, se utilizeaza **esantionarea incoerenta** la care esantioanele se iau la intervale aleatoare de timp (fig. 7.41,a). Numarul de esantioane trebuie sa fie suficient de mare astfel încât informatia

referitoare la valoarea de vârf, medie si efectiva, sa fie corecta. În fig. 7.41,b este prezentata schema bloc a unui voltmetru cu esantionare incoerenta la care obtinerea de intervale de esantionare se realizeaza prin comanda modularii în frecventa a semnalului de esantionare de baza cu ajutorul unui semnal triunghiular de joasa frecventa.

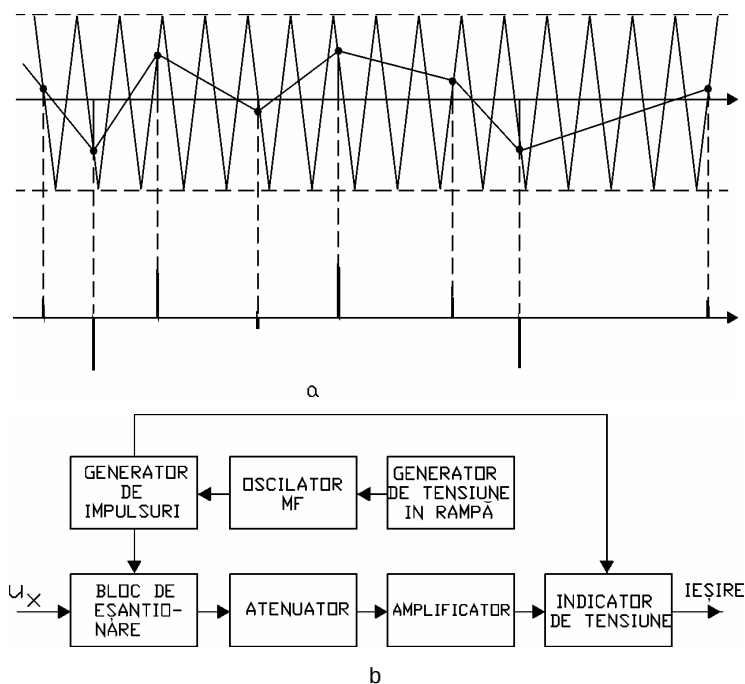


Fig. 7.41

7.3. MASURAREA CURENTILOR

7.3.1. Ampermetre magnetoelectrice

Principiul de functionare si elementele constructive ale dispozitivelor magnetoelectrice au fost prezentate în paragraful 7.1.1 (v. fig. 7.1). Deviatia α de regim permanent este proportionala cu curentul de masurat I ce trece prin bobina mobila :

$$\alpha = KI .$$

Indicatia în curent alternativ a acestor aparate este nula deoarece valoarea medie a cuplului activ instantaneu pe o perioada este zero.

Sensibilitatea de curent S_I a ampermetrelor magnetoelectrice este invers proportionala cu cuplul rezistent specific D . La aparatele destinate masurarii curentilor de ordinul amperilor si miliamperilor cuplul rezistent este dat de unul sau

doua resorturi spirale care se opun miscarii de rotatie. În cazul masurarii unor curenti de valori foarte mici cresterea sensibilitatii se realizeaza prin:

- asigurarea suspensiei pe benzi tensionate sau fire de torsiune;
- utilizarea unor magneti permanenti de inductie mare si a unor bobine cu numar mai mare de spire;
- utilizarea unui dispozitiv optic pentru citirea deviatiilor .

Datorita sensibilitatii ridicate, consumului propriu redus, clasei de precizie bune, ampermetrele magnetoelectrice se utilizeaza cu precadere ca aparate de laborator. Ele se construiesc pentru domenii cuprinse între 0,1 si 100 A cu sunturi interioare si pâna la 10 kA cu sunturi exterioare .

Daca R_a este rezistenta bobinei mobile a ampermetrului magnetoelectric, I_a – domeniul de masura al acestuia, I – curentul ce se masoara, de n ori mai mare decât I_a ($I = nI_a$), rezistenta R_s a suntului simplu se calculeaza cu relatia :

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

Schema electrica a suntului este prezentata în figura 7.42,a, iar a unui sunt multiplu, în figura 7.42,b.

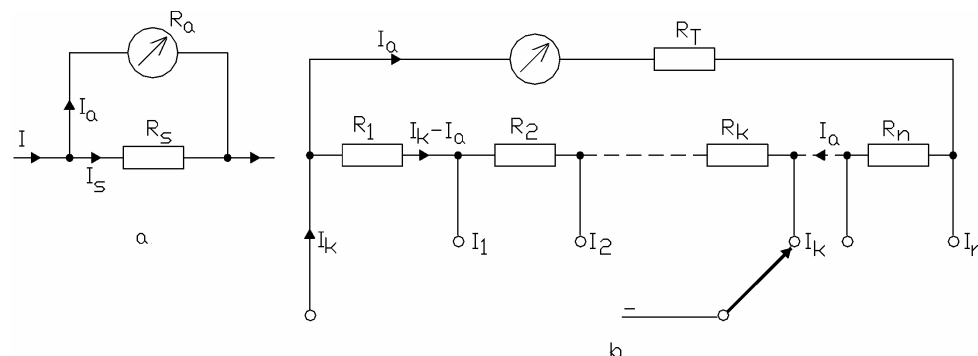


Fig. 7.42

Cele n secțiuni ale suntului multiplu, de valori $R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_n$ pot fi determinate prin rezolvarea unui sistem de n ecuații care pot fi scrise pentru cele n domenii stabilite inițial : $I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_n$.

Una din ecuații – de exemplu ecuația pentru domeniul k – se obține apelând la caderea de tensiune pe sunt cu caderea de tensiune la bornele aparatului :

$$I_a(R_a + R_T + R_{k+1} + \dots + R_n) = (I_k - I_a)(R_1 + R_2 + \dots + R_k) ,$$

de unde :

$$I_k = \frac{(R_1 + R_2 + \dots + R_n) + R_a + R_T}{R_1 + R_2 + \dots + R_k} I_a, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n .$$

Rezistența R_T (în serie cu bobina mobilă) realizată în general din manganina, servește la compensarea erorilor de temperatură.

7.3.2. Ampermetre electrodinamice

Ampermetrele electrodinamice sunt aparate precise (clasa de precizie 0,2 si 0,1) construite de regula ca aparate de laborator si pot fi utilizate atât pentru masurarea curentului continuu cât si a celui alternativ. Constructia si functionarea dispozitivelor electrodinamice a fost prezentata în paragraful 7.1.2 (v. fig. 7.29).

Pentru valori reduse ale curentilor (sub 0,5 A) bobina mobila 2 – înseriata cu bobinele fixe 1-1' – se alimenteaza prin resorturile spirale. Pentru valori mai mari ale curentului bobina mobila se conecteaza în paralel cu un sunt legat în serie cu bobina fixa, asa cum se observa în figura 7.43.

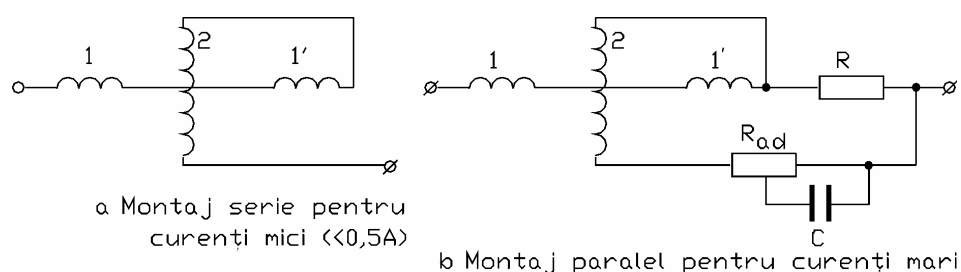


Fig. 7.43

Functionarea ampermetrelor electrodinamice este influentata de câmpurile magnetice exterioare, temperatura mediului ambiant si în c.a. de frecventa curentului masurat. Reducerea erorilor determinate de prezenta câmpurilor magnetice exterioare se poate realiza prin ecranarea dispozitivului de masurat. Erorile de temperatura sunt nesemnificative pentru ampermetrele ale caror bobine sunt legate conform schemei din figura 7.43,a. În cazul legarii bobinelor dupa schema din figura 7.43,b, eroarea de temperatura – determinata în principal de variatia rezistentei bobinei mobile – se poate diminua considerabil prin conectarea în serie cu aceasta a unui rezistor R din manganina.

La functionarea în curent alternativ a ampermetrelor electrodinamice, modificarea frecventei curentului este o posibila sursa de eroare.

Daca la ampermetrele cu schema serie, influenta frecventei asupra rezultatului masurarii este neglijabila (pâna la 1-2 kHz), la ampermetrele cu schema în paralel compensarea erorilor de frecventa se realizeaza prin suntarea unei parti din rezistenta aditionala a bobinei mobile cu un condensator de capacitate C , care compenseaza reactanta inductiva a circuitului (într-un interval restrâns de variatie a frecventei).

7.3.3. Ampermetre electromagnetice (feromagnetice)

Ampermetrele feromagnetice sunt aparate de masura analogice folosite pentru masurarea curentului alternativ de frecventa industrială, putând însa fi folosite si pentru masurarea curentului continuu. Deviatia α a sistemului mobil este proportionala cu patrul curentului: $\alpha = kI^2$. Functionarea în c.c. a acestor ampermetre

este influentata de histerezisul magnetic al piesei mobile, iar în c.a. de curentii turbionari indusi, care conduc la cresterea pierderilor în miezul feromagnetic. Se construiesc în general ca aparate de tablou având clasa de precizie 1,5 sau 2,5 dar printr-o constructie adecvata (piese feromagnetice realizate din aliaje cu permeabilitate mare si câmp coercitiv redus), erorile determinate de histerezis si curentii turbionari sunt reduse considerabil, ceea ce permite realizarea ampermetrelor portabile de precizie, cu indice de clasa 0,5 sau 0,1.

Ampermetrele feromagnetice se construiesc pentru curenti de la 10 mA pâna la 100 A, cu unul sau mai multe domenii de masurare .

La ampermetrele cu domenii multiple, bobina este realizata din mai multe sectiuni, schimbarea domeniului de masurare realizându-se fie prin schimbarea conexiunii serie sau în paralel a sectiunilor fie prin schimbarea bornei de utilizare (figura 7.44, în care este reprezentata schema extinderii domeniului de masurare). Pentru masurarea unor curenti de valori mari si foarte mari, ampermetrele ferodinamice se conecteaza în secundarul unor transformatoare („reductoare”) de curent, care au curentul secundar nominal $I_{2n} = 5$ A. Din aceste considerente, ampermetrele de tablou (legate prin reductoare de curent) se construiesc pentru curentul nominal de 5 A. De obicei însa, la etalonarea scarii se are în vedere raportul de transformare al curentilor K_i , astfel încât indicatia aparatului da direct curentul din primarul transformatorului de curent, înseriat în circuitul de utilizare.

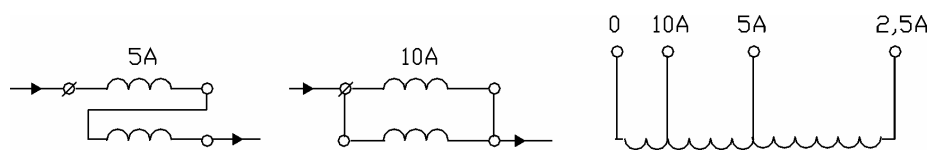


Fig. 7.44

Aparatele ferodinamice se caracterizeaza prin robustețe, fiabilitate ridicată, capacitate de supraîncărcare relativ ridicată. Ele au însa un consum propriu destul de ridicat, iar precizia este relativ modestă.

7.3.4. Ampermetre cu amplificator si voltmetru de curent continuu

Daca un voltmetru cu rezistenta internă R_v cunoscută se leaga în serie într-un circuit, el va masura caderea de tensiune pe care curentul din acel circuit o produce pe rezistenta aparatului:

$$\Delta U = R_v I,$$

de unde rezulta: $I = \Delta U / R_v$, iar scara voltmetrului poate fi etalonată direct în [A]. Rezistenta de intrare având o valoare foarte mare (de ordinul sutelor de kO), caderea de tensiune va fi foarte mică (de ordinul μV), motiv pentru care este necesară prezenta unui amplificator .

Modificarea sensibilitatii (si implicit a domeniului de masurare) a aparatului se poate realiza fie cu ajutorul unui atenuator în trepte conectat la intrarea aparatului (fig. 7.45), fie prin utilizarea unei reactii negative variabile (fig. 7.45,b) care permite modificarea câștigului amplificatorului.

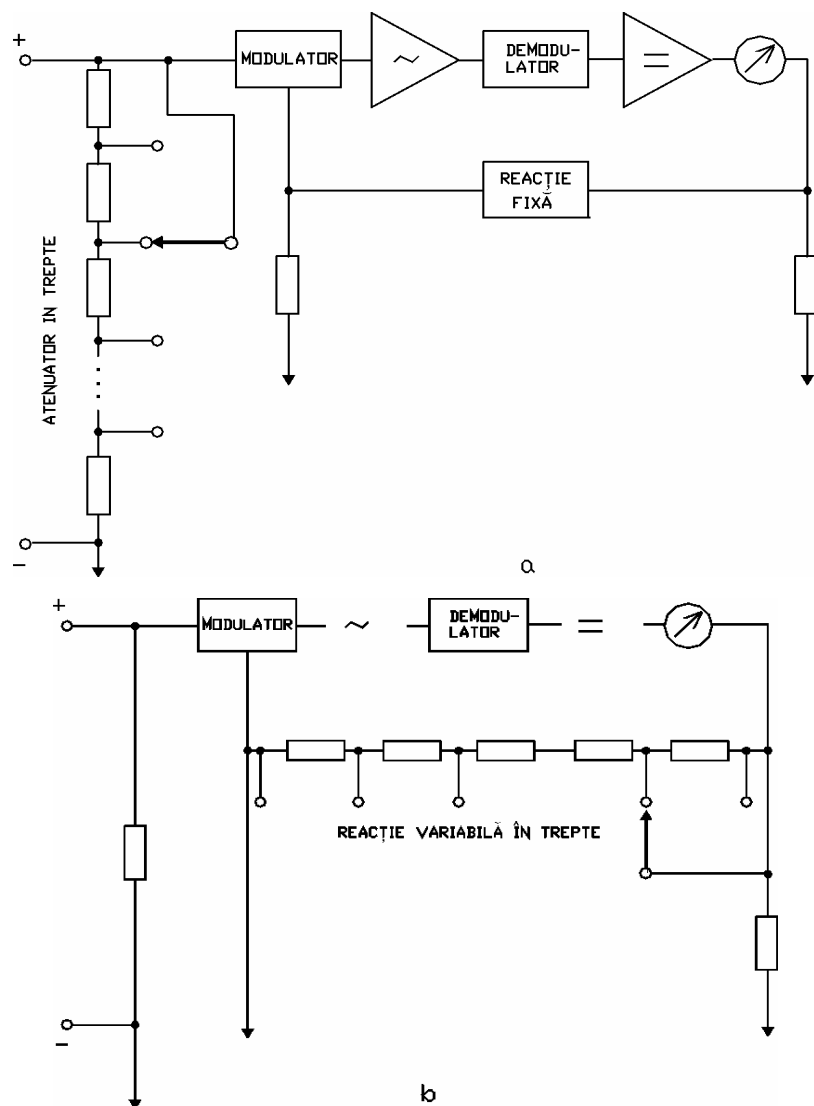


Fig. 7.45

Datorita amplificarii mari a amplificatorului se pot masura curenti de ordinul pA, iar prin utilizarea la intrare a unor trepte de rezistenta alese corespunzator, se poate acoperi o plaja larga de valori ale curentilor de masurat (pA - μ A - mA - A).

Valoarea maxima a rezistentei de intrare este limitata de zgomotul de agitatie termica pe care îl genereaza (suparator la semnale mici).

7.3.5. Ampermetre cu redresoare

Ampermetrele cu redresoare se obtin prin asocierea unui dispozitiv magneto-electric cu unul sau mai multe dispozitive de redresare. Se pot masura astfel curenti alternativi beneficiind de performantele aparatelor magnetoelectrice (precizie si sensibilitate ridicata, consum propriu scazut).

În figura 7.46. este prezentata schema electrica a unui aparat magneto-electric cu redresor.

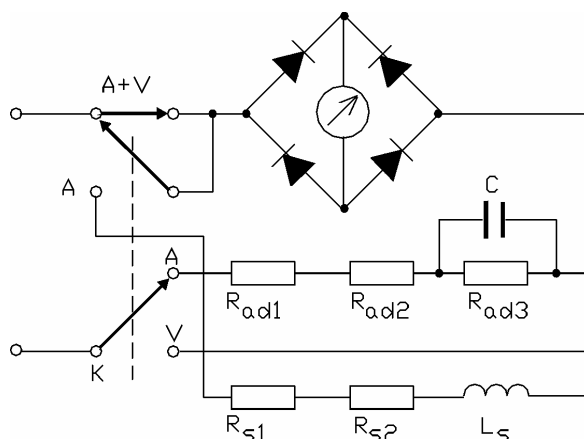


Fig. 7.46

În functie de pozitia comutatorului K , schema permite masurarea curentului alternativ sau a tensiunii alternative. Sunturile (R_{s1} , R_{s2}) si rezistentele aditionale (R_{ad1} , R_{ad2} , R_{ad3}) sunt realizate din materiale cu coeficienti de temperatura de semne contrare, în scopul eliminarii erorilor de temperatura. Alte surse posibile de eroare (care influenteaza negativ functionarea aparatelor) sunt forma si frecventa semnalului masurat. Daca se folosesc diode cu germaniu, eroarea aparatului este de $\pm 3\%$ pâna la frecventa de 10 kHz, iar peste aceasta frecventa eroarea creste cu 1% pentru fiecare kHz.

Compensarea erorilor de frecventa se poate realiza prin conectarea unui condensator în paralel cu o parte a rezistentei aditionale sau prin utilizarea unor diode cu germaniu si carbura de siliciu.

Pentru masurarea curentilor alternativi de înalta frecventa se recomanda utilizarea ampermetrelor cu termocuplu.

7.3.6. Ampermetre cu termocuplu

Ampermetrele cu termocuplu se utilizeaza cu precadere la masurarea valorii efective a curentilor de radiofrecventa, masurând valoarea efectiva a acestora, indiferent de forma de unda si de frecventa.

Functionarea acestora se bazeaza pe efectul *Seebeck* care consta în aparitia unei tensiuni continue (tensiune termoelectrica) la capetele „reci” ale unui termo-

cuplu format din doi electrozi cu proprietati termoelectrice cât mai diferite ,atunci când capetele „calde” (sudate) ale acestuia sunt încălzite la o anumita temperatura. Astfel, dacă T este temperatura capetelor sudate, T_0 – temperatura capetelor reci, tensiunea termoelectromotoare E_T , masurata cu ajutorul unui dispozitiv magneto-electric, este data de o relatie de forma:

$$E_T = k(T - T_0) .$$

Dacă variația de temperatura este determinată de efectul termoelectric al curentului alternativ care parcurge o rezistență înseriată în circuitul de utilizare, se poate aprecia că între tensiunea termoelectromotoare E_T și valoarea efectivă a curentului (care străbate firul încălzitor) există o corespondență univocă (în condițiile menținerii rezistenței firului încălzitor și a temperaturii T_0 la valori constante).

După modul în care se transmite căldura de la firul încălzitor la termocuplu deosebim :

- termocupluri cu încălzire directă;
- termocupluri cu încălzire indirectă .

La termocupluri cu încălzire directă (fig. 7.47,a) capetele calde ale acestora sunt în contact direct cu firul încălzitor realizat din material magnetic cu o mare rezistivitate (constantan, crom-nichel, platin-cromel). Aceste termocupluri au dezavantajul de a nu putea fi etalonate în c.c. deoarece în acest caz indicația este dependentă de sensul curentului (o parte a curentului de etalonare trecând prin aparat).

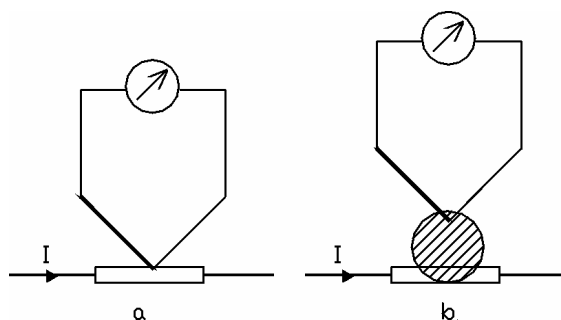


Fig. 7.47

Acest fenomen dispare la termocuplurile cu încălzire indirectă (fig.7.47,b) deoarece aici nu există nici o legătură galvanică între termocuplul propriu-zis și firul încălzitor.

Cresterea sensibilității termocuplurilor se poate realiza prin introducerea acestora într-un balon de sticlă vidat, balon ce se introduce la rândul său într-o cutie realizată dintr-un material izolant termic umplută cu vată de sticlă (în scopul reducerii pierderilor de căldură).

Precizia etalonarii este de 0,05% la 1 MHz si 0,5% la 50 MHz, principalele surse de eroare fiind efectul pelicular si impedantele parazite ale firului încălzitor.

Domeniul de masurare este cuprins între câțiva mA si zeci de A.

7.3.7. Ampermetre bazate pe efectul Hall

Sunt ampermetre care utilizeaza ca element de detectie o *sonda Hall*. Sonda Hall consta dintr-o placuta semiconductoare de forma paralelipipedica de grosime foarte mica în comparatie cu celelalte dimensiuni, parcursa de un curent de comanda I_C si aflata într-un câmp magnetic de inductie $\vec{B}$ perpendicular pe acesta.

În aceste conditii, între punctele A si B (fig. 7.48), pe o directie perpendiculara pe planul format din I_C si B , apare o tensiune U_H (*tensiunea Hall*) care este direct proportionala atât cu I_C cât si cu B :

$$U_H = k_1 B I_C,$$

unde k_1 este o constanta care depinde de materialul si dimensiunile placii.

Daca curentul I_C este constant, dependenta dintre U_H si inductanta B este liniara :

$$U_H = k_1' B .$$

Pe portiunea liniara (liniarizata) a caracteristicii de magnetizare, $B = k_2 H$ (H – intensitatea câmpului magnetic). Presupunând câmpul magnetic creat de o bobina parcursa de un curent I si de o dependenta liniara între intensitatea câmpului magnetic H si curentul care l-a determinat, rezulta:

$$H = k_3 I \text{ si } U_H = k_1' k_2 k_3 I$$

sau

$$U_H = k I .$$

O schema principiala a unui ampermetru cu sonda Hall este prezentata în figura 7.49.

Generatorul Hall este dispus în interiorul unui transformator care, pe o coloana are dispusa o înfasurare parcursa de curentul de masurat, iar pe cealalta coloana o înfasurare parcursa de curentul de la iesirea amplificatorului A_1 , la intrarea caruia se aplica tensiunea Hall. Prin solutia adoptata se realizeaza masurarea unei game largi de curenți – pâna la câțiva amperi – fara a satura miezul, deoarece fluxurile determinate de cele două înfasurari sunt opuse. Semnalul dezvoltat pe R

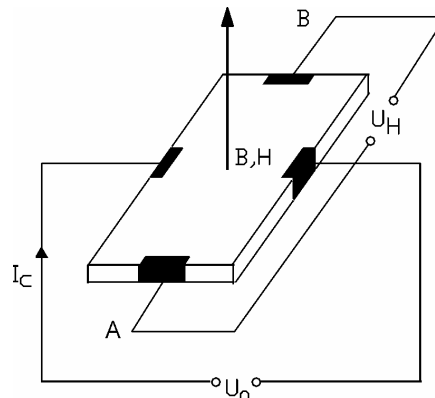


Fig. 7.48

este amplificat de amplificatorul A_2 si aplicat la intrarea unui osciloscop sau a unui voltmetru. Indicatia ampermetrului a carui functionare se bazeaza pe efectul Hall este independenta de forma de unda si de frecventa, asa încât aceste aparate pot fi utilizate deopotriva pentru masurarea curentului continuu ($f = 0$) cât si a celui alternativ (pâna la frecvente de ordinul sutelor de MHz).

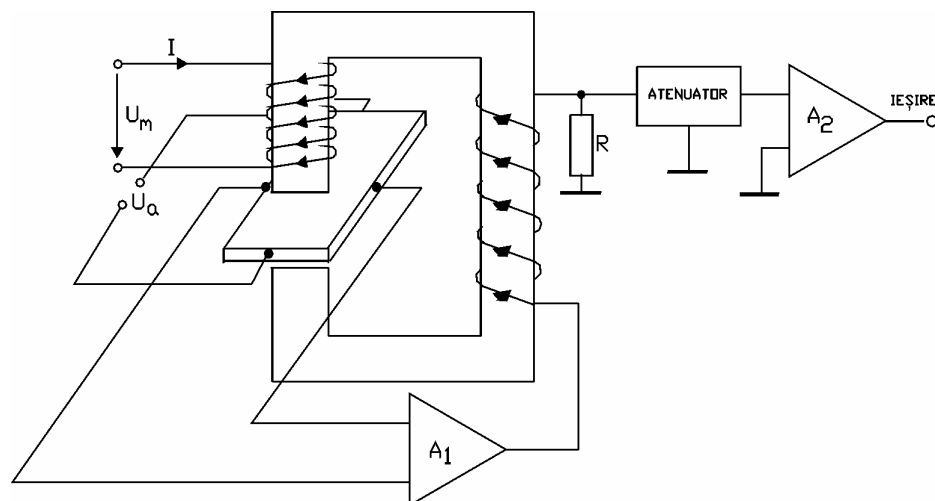


Fig. 7.49

Deoarece la variatiile de temperatura se modifica atât constanta k_1 cât si conductivitatea materialului semiconductor, pentru reducerea erorilor de temperatura se utilizeaza scheme speciale de compensare cu termorezistente legate în serie sau paralel în circuitul curentului de comanda .

7.4. MULTIMETRE

Multimetrele sunt aparate de masura versatile si economice capabile sa masoare mai multe marimi: tensiuni alternative si continue, curenti continui si alternativi si uneori capacitati, frecvente, perioade si alte marimi. Ele reunesc în aceeași carcasa dispozitivul de masura, sunturile, rezistentele aditionale si comutatoarele necesare alegerii marimii de masurat si a domeniului de masurare si pot fi de doua tipuri: analogice si digitale.

7.4.1. Masurarea tensiunilor

Pentru masurarea tensiunilor continue, cea mai mare parte a multimetrelor analogice folosesc un dispozitiv de masurat magnetoelectric asociat cu mai multe rezistente legate în serie, în scopul modificarii sensibilitatii acestuia (domeniului de masurare). Îmbunatatirea performantelor (cresterea rezistentei de intrare si a

sensibilitatii) se poate realiza prin utilizarea unor amplificatoare de c.c. amplasate înaintea dispozitivului de masurat.

Multimetrele numerice utilizeaza fie conversia tensiune-timp (cu tensiune de referinta liniar crescatoare), fie tehnica aproximarii succesive sau în trepte a tensiunii fixe u_x .

Masurarea tensiunilor alternative se realizeaza fie prin conversia acesteia într-o tensiune continua care poate fi masurata prin una din metodele prezentate mai sus, fie utilizând detectoare de valori medii, efective sau de vârf. În cazul utilizarii detectoarelor de valori medii sau de vârf, la etalonarea scalei se va tine seama de relatia care exista (în regim sinusoidal) între valoarea efectiva si valorile medie, respectiv de vârf :

$$U_{ef} = 1,11U_{med} \text{ si } U_{ef} = 0,707U_V .$$

Domeniul de frecvente al multimetrelor este mai redus decât al voltmetrelor specializate, datorita capacitatilor parazite care apar între firele interioare de conexiuni (de lungimi mai mari) si masa.

7.4.2. Masurarea curentului

Masurarea curentului continuu se poate realiza fie cu ajutorul multimetrelor analogice, care utilizeaza un dispozitiv magnetoelectric asociat cu mai multe sunturi, fie cu ajutorul multimetrelor digitale, caz în care se masoara cu ajutorul unui voltmetru numeric caderea de tensiune continua determinata de trecerea curentului printr-o rezistenta etalon.

Valorile uzuale ale curentilor continui masurabili cu ajutorul multimetrelor sunt cuprinse între 200 μA si 2 A.

În curentul alternativ masurarea curentului este îngreunata de necesitatea de a lucra fara punct de masa, prin introducerea rezistentei etalon în serie în circuit. Din acest motiv unele multimetre nu au posibilitatea masurarii curentului alternativ.

În figura 7.50 este prezentata schema unui multimetru analogic cu redresoare, iar în figura 7.51 schema bloc a unui multimetru digital.

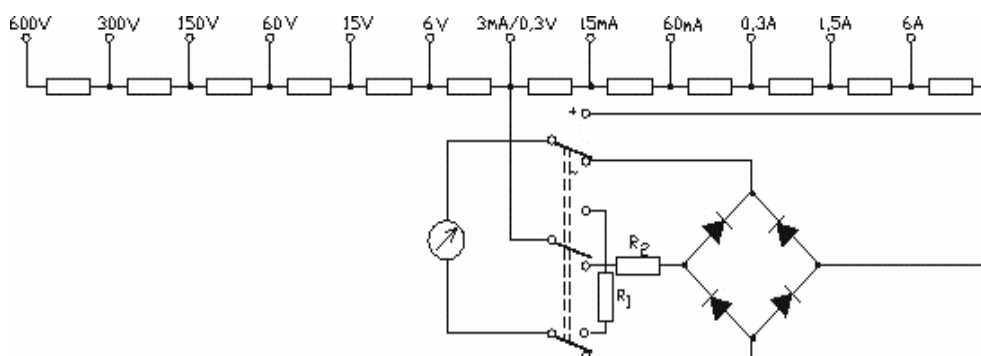


Fig. 7.50

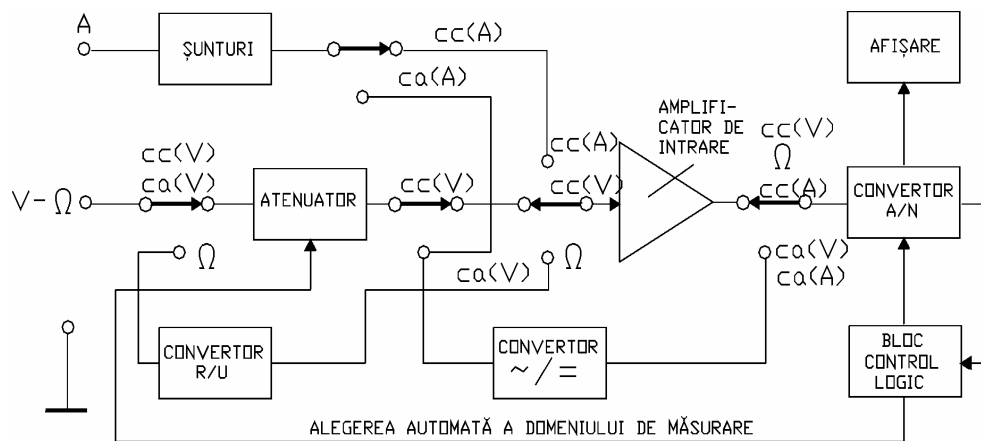


Fig. 7.51