

Măsurarea mărimilor electrice și neelectrice

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

Măsurarea mărimilor electrice și neelectrice / Petre Blaga,
Eduard Minciuc, Marinel Temneanu, ... - București :
Editura Academiei Oamenilor de Știință din România,
2011
Bibliogr.
ISBN 978-606-8371-17-7

I. Blaga, Petre
II. Minciuc, Eduard
III. Temneanu, Marinel

621.3

Editura Academiei Oamenilor de Știință din România

Adresa: Splaiul Independenței, nr. 54, sectorul 5, cod 050094 București, România

Redactor: ing. Mihail CĂRUȚAȘU

Tehnoredactor: prof. Andrei PETRESCU

Documentarist: ing. Ioan BALINT

Coperta: ing. sist. Adrian Nicolae STAN

**Copyright © Editura Academiei Oamenilor de Știință din România,
București, 2011**

Petre Blaga Eduard Minciuc Marinel Temneanu
Codrin Donciu Ioana Ionel Dorin Lelea
Flaviu Frigură

Măsurarea mărimilor electrice și neelectrice



Editura Academiei Oamenilor de Știință din România
București
2011

Cuprins

Cap. 1. Procesul de măsurare

Metode de măsurare	9
Caracteristici metrologice ale aparatelor de măsură	10
Erori și incertitudini de măsurare	11
Erori în cadrul aparatelor analogice	11
Erori în cadrul aparatelor numerice	12
Incertitudinea de măsurare	12
Distribuția Gauss	12
Distribuția Student	14
Propagarea erorilor aleatorii	15
Propagarea erorilor sistematice	15
Prezentarea rezultatului măsurării	15
Măsurări directe sau indirecte cu erori sistematice predominante	15
Măsurări directe cu erori aleatorii importante	15
Măsurări directe de precizie	15
Măsurări indirecte, de precizie ridicată afectate de erori sistematice și aleatorii	16

Cap. 2. Măsurarea tensiunii și curentului continuu și alternativ

Instrumente analogice	17
Instrumentul magnetoelectric cu magnet exterior	17
Aparate cu instrument magnetoelectric	18
Instrumentul magnetoelectric în schemă de ampermetru	18
Instrumentul magnetoelectric în schemă de voltmetru	19
Instrumentul magnetoelectric cu redresor	20
Instrumentul feromagnetic	22
Instrumentul feromagnetic cu atracție	22
Instrumentul electrodinamic	23
Instrumentul ferodinamic	23
Voltmetre numerice	24
Voltmetrul cu aproximații succesive	24
Voltmetrul cu rampă liniară	26
Voltmetrul cu rampă variabilă	26
Voltmetrul cu rampă dublă	27

Cap. 3. Măsurarea impedențelor

Ohmetre	31
Ohmetrul serie	31
Ohmetrul paralel	32
Megohmetrul cu logometru magnetoelectric	32
Punți de curent continuu	33
Puntea Wheatstone	33
Puntea dublă Thomson	36
Punți de curent alternativ	37
Punți pentru măsurarea parametrilor bobinelor	37
Punți pentru măsurarea parametrilor condensatoarelor	39

Cap. 4. Măsurarea temperaturii

Tipuri de aparate de măsură	41
Termometre mecanice	42
Termometrul manometric	43
Termometrul bazat pe dilatarea metalelor	44
Termometre electrice	45
Termometre de radiație	51

Cap. 5. Măsurarea emisiilor

Noțiuni introductive. Definiții	57
Principii de măsurare a noxelor gazoase	59
Măsurarea emisiilor poluante în emisie	60

Cap. 6. Măsurarea presiunii

Tipuri de aparate de măsură	71
Aparate hidrostatice	71
Aparate cu echilibru de forțe	73
Aparate cu element elastic	74
Traductoare de presiune	78

Cap. 7. Măsurarea imisiilor

Măsurarea concentrației de SO ₂ în aerul înconjurător	89
Măsurarea concentrației de NO și NO ₂ în aerul înconjurător	91
Măsurarea concentrației de CO în aerul înconjurător	94
Măsurarea concentrației PM ₁₀ în aerul înconjurător	96
Măsurarea concentrației de O ₃ în aerul înconjurător	100
Măsurarea concentrației de CH ₄ , COV și COT în aerul înconjurător	101

Cap. 8. Măsurarea debitului

Tipuri de aparate de măsură	103
Debitmetre cu modificarea geometriei de curgere	103
Debitmetre cu determinarea vitezei de curgere	106
Debitmetre cu echilibru de forțe	111
Debitmetre cu contor volumic	113
Debitmetre electromagnetice	116
Debitmetre ultrasonice	118
Debitmetre cu efect Coriolis	123
Debitmetre termice	126

Cap. 9. Măsurarea nivelului

Tipuri de aparate de măsură	129
Nivelmetre manuale	130
Sticla de nivel	131
Nivelmetre bazate pe forța arhimedică	133
Nivelmetre prin presiune	134
Nivelmetre rezistive	136
Nivelmetre capacitive	136
Nivelmetre prin impedanță sau admitanță	137
Nivelmetre conductive	138
Nivelmetre cu radar	138
Nivelmetre sonice/ultrasonice	141
Nivelmetre optice	141
Nivelmetre cu radiații radioactive	142
Nivelmetre termice	142
Nivelmetre cu vibrații	144

Bibliografie	145
--------------	-----

Capitolul 1

Procesul de măsurare

Metode de măsurare

Procesul de măsurare presupune preluarea informației de la măsurand sub forma unei energii, transmiterea acesteia la un dispozitiv care stabilește valoarea mărimii măsurate prin comparație cu un etalon și care o aplica unui bloc de ieșire pentru vizualizare. Mărimile pot fi active, dacă sunt purtătoare de energie (tensiune curent etc), sau pasive, dacă informația este conținută în structura măsurandului (rezistență, capacitate etc).

Principalele metode de măsurare sunt:

- metoda directă, în care valoarea măsurată se obține prin utilizarea unui singur aparat de măsură;
- metoda directă cu substituție, la care se realizează două măsurări succesive, măsurandul investigat fiind înlocuită în cea de-a doua măsurare cu un măsurand de aceeași natură ca și mărime de măsurat, dar reglabil; reglajul se realizează până ce se obține aceeași indicație a aparatului de măsură ca la prima măsurare, incertitudinea de măsurare reducându-se doar la cea de construcție a măsurandului reglabil, eliminându-se erorile introduse de lanțul de măsurare;
- metoda indirectă, în care valoarea măsurată se obține pe baza unei relații de calcul în care parametrii sunt mărimi care sunt măsurate direct;
- metoda de rezonanță, la care, pentru un măsurand care este parte componentă a unui circuit rezonant, se desfășoară operații de reglaj în frecvență sau a valorilor unor componente reglabile, astfel încât să se obțină starea de rezonanță;
- metoda de punte, la care, după realizarea echilibrării acesteia (utilizând un indicator de nul), valoarea măsurată se obține printr-o relație de calcul în care intervin mărimile elementelor punții;
- metoda de punte cu substituție, implică două măsurări succesive, măsurandul fiind înlocuit în cea de-a doua determinare cu unul reglabil, incertitudinea de măsurare reducându-se la cea constructivă a măsurandului reglabil;
- metoda compensației, care constă în egalarea a două mărimi active (tensiuni) prin reglajul uneia dintre ele, mărimile fiind de semn contrar; echilibrul se urmărește cu un indicator de nul.

Metodele de punte cu substituție și compensație conduc la obținerea unor măsurări de precizie ridicată, metodele directe și directe cu substituție conduc la obținerea unor măsurări de precizie medie iar cele indirecte și de rezonanță conduc la obținerea unor precizii reduse.

Caracteristici metrologice ale aparatelor de măsură

Comportarea aparatelor de măsură poate fi interpretată din punct de vedere metrologic după următorii parametri: interval de măsurare, rezoluție, sensibilitate, constantă, prag de sensibilitate, consum propriu și exactitate.

Intervalul de măsurare, sau **domeniul de măsurare**, reprezintă intervalul cuprins între valoarea minimă și cea maximă ale valorilor care pot fi măsurate cu un aparat dat.

Rezoluția reprezintă cea mai mică variație a rezultatului măsurării care poate fi apreciată de utilizator pe instrumentul de afișare al aparatului de măsurat și se interpretează ca fiind diferența dintre două numere consecutive ce pot fi percepute pe afișaj. Dacă afișajul este analogic atunci rezoluția se referă la diferența dintre două diviziuni adiacente sau fracțiuni de diviziune, iar dacă afișajul este numeric atunci rezoluția reprezintă rangul cifrei cel mai puțin semnificative.

Sensibilitatea este o mărime dimensională, care reprezintă raportul dintre variația mărimii de ieșire și variația corespunzătoare a mărimii de intrare, a aparatului de măsură.

$$S = \frac{dY}{dX}. \quad (1-1)$$

Se poate exprima în acest context și sensibilitatea relativă, care reprezintă raportul variațiilor relative ale mărimilor de ieșire și de intrare. Pentru aparate de măsură cu scara liniară, sensibilitatea este constantă, iar inversul sensibilității reprezintă constanta aparatului.

$$S = \frac{dY/Y}{dX/X}. \quad (1-2)$$

Constanta aparatului, utilizată, pentru aparatele cu afișare analogică, reprezintă valoarea unei diviziuni exprimată în unități de măsură ale mărimii măsurate.

$$K = \frac{1}{S} = \frac{X}{Y}. \quad (1-3)$$

Pentru exemplificare, constanta unui voltmetru se exprimă în $[V/div]$, iar a unui ampermetru se exprimă în $[A/div]$. Constanta este utilă pentru calculul valorii X a mărimii măsurate, atunci când se cunoaște deviația $\alpha[div]$ a acului indicator.

$$X = K\alpha. \quad (1-4)$$

Pragul de sensibilitate reprezintă cea mai mică variație a mărimii de intrare care poate fi pusă în evidență de aparatul de măsură.

Dacă rezoluția este o mărime care caracterizează ieșirea, iar pragul de sensibilitate caracterizează intrarea, atunci sensibilitatea reprezintă o caracteristică de transfer a aparatului de măsură.

Capacitatea de suprasarcină reprezintă capacitatea aparatului de a suporta o valoare de intrare mai mare decât valoarea maxima de regim permanent, pe o

anumită durată de timp precizată, fără ca parametrii de funcționare ai aparatului să se modifice.

Fiabilitatea metrologică este dată de către durata de timp în care aparatul funcționează cu respectarea parametrilor de performanță prescriși.

Erori și incertitudini de măsurare

Erori în cadrul aparatelor analogice

Clasa de precizie reprezintă eroarea absolută maximă $(\Delta x)_{\max}$ pe care o poate avea aparatul în oricare punct al scalei sale, raportată la valoarea corespunzătoare deviației maxime a acului indicator x_n și este exprimată în procente

$$c = \frac{(\Delta x)_{\max}}{x_n} \cdot 100[\%], \quad (1-5)$$

Clasa de precizie este notată pe cadranul aparatului de măsură. Prin intermediul acesteia se poate calcula eroarea absolută maximă, valabilă pentru oricare punct al scalei aparatului.

$$(\Delta x)_{\max} = \frac{c}{100} x_n, \quad (1-6)$$

Dacă eroarea absolută maximă este caracteristică pentru oricare punct al scalei, evident pentru o anumită gamă de măsurare, eroarea relativă este specifică fiecărui punct al scalei, fiind o raportare la valoarea mărimii măsurate. Pentru un aparat de măsură cu clasa de precizie c , care are o deviație maximă x_n , iar valoarea mărimii măsurate este x , eroarea relativă, exprimată procentual, va fi:

$$\varepsilon = \frac{(\Delta x)_{\max}}{x} \cdot 100[\%], \quad (1-7)$$

Înlocuind expresia erorii absolute maxime ca funcție de clasa de precizie, se va obține:

$$\varepsilon = c \frac{x_n}{x} [\%], \quad (1-8)$$

Se poate observa, urmărind expresia erorii relative că aceasta este cu atât mai mare cu cât valoarea mărimii măsurate este mai mică decât deviația maximă. Astfel, pentru a reduce cât mai mult erorile introduse de aparat este necesar ca să se aleagă o scală de măsurare care să aibă deviația maximă mai mare decât valoarea măsurată dar să fie cât mai apropiată ca valoare de aceasta. Recomandarea generală este utilizarea unei scale la care mărimea măsurată să se situeze în ultimul sfert al acesteia.

Concluzionând, pentru realizarea unei măsurări precise, este important ca pe lângă alegerea aparatului în funcție de clasa de precizie, să se aleagă convenabil și gama de măsurare (domeniul de măsură cuprins între limita minimă și cea maximă a deviației). Spre exemplu, dacă se măsoară o tensiune $U=5V$ cu un voltmetru cu deviația maximă $x_n=10V$ și clasa de precizie $c=2$, eroarea relativă va fi de 4%.

Măsurând aceeași tensiune cu un voltmetru cu o precizie mai mare, având $c=1.5$, dar deviația maximă $x_n=20V$, eroarea relativă va fi de 6%. Chiar dacă cel de-al doilea voltmetru este mai precis decât primul, alegerea unei game de măsurare neconvenabile a condus la obținerea unei erori relative mai mari.

Erori în cadrul aparatelor numerice

În cadrul aparatelor numerice există două modalități de exprimare a erorilor și se referă la eroarea maximă tolerată a aparatului. În prima variantă, valoarea erorii se calculează în funcție de valoarea citită și de capătul de scală, ca procent din acestea. Astfel, dacă ct este valoarea citită iar cs este capătul de scală, atunci eroarea tolerată va fi:

$$\varepsilon = \pm(a\%ct + b\%cs). \quad (1-9)$$

În cea de-a doua variantă se face apel la rezoluția aparatului, eroarea calculându-se ca procent din valoarea citită și un anumit număr de unități ale celei mai puțin semnificative cifre a afișajului (LSB), corespunzătoare gamei utilizate. Această unitate a celei mai puțin semnificative cifre este de fapt rezoluția aparatului pe gama de măsură utilizată.

$$\varepsilon = \pm(a\%ct + n \cdot \text{cifre}) \quad (1-10)$$

Incertitudinea de măsurare

Măsurările sunt afectate de erori care pot fi de natură sistematică (apar la fiecare repetare a experimentului în condiții identice de desfășurare) sau de natură aleatorie.

Distribuția Gauss. Dacă se măsoară aceeași mărime de n ori, în condiții identice, se va obține un șir de valori (rezultate) $X_1, X_2, \dots, X_n$. Atât rezultatele cât și erorile de măsurare se consideră variabile aleatoare, care pot lua valori într-un anumit interval dat. Probabilitatea ca variabila aleatoare să ia valori într-un anumit interval poartă denumirea de funcție de distribuție. Pentru interpretarea distribuției este necesară cunoașterea următorilor parametri:

- media aritmetică (experimentală), care reprezintă cea mai bună aproximație a mărimii investigate, $\bar{X}$;

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1-11)$$

- abaterea valorilor individuale față de media aritmetică a celor n rezultate;

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}, \quad \sum_{i=1}^n \Delta X_i = 0 \quad (1-12)$$

- abaterea standard, care reprezintă o măsură a dispersiei rezultatelor X_i în jurul mediei;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n}} \quad (1-13)$$

În vederea testării dacă un șir de rezultate respectă o distribuție de tip *Gauss*, se construiește histograma de frecvențe. Pentru aceasta, în abscisa graficului se reprezintă intervalul de variație al rezultatelor X_i . Intervalul de variație se divide în k sub-intervale cu lățime calculată după formula expresia:

$$d = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,22 \ln n} \quad (1-14)$$

Fiecărui sub-interval i se va asocia un dreptunghi a cărui înălțime va fi egală cu numărul de rezultate n_i , care aparțin sub-intervalului respectiv. Dacă histograma obținută va avea forma unui clopot atunci rezultatele se supun unei repartiții de tip *Gauss* (pentru $n > 50$) sau *Student* ($n < 50$).

Probabilitatea ca un rezultat individual să nu depășească un interval, se exprimă procentual și se numește **nivel de încredere** $N(\%)$. Complementar se definește riscul ca fiind $R(\%) = 100 - N(\%)$.

Eroarea maximă a unui rezultat individual este dată pe baza unui factor de multiplicare a abaterii standard, care depinde de nivelul de încredere abordat.

$$\Delta X_{\max} = \pm q \sigma \quad (1-15)$$

Atât nivelul de încredere cât și riscul pentru o serie de valori ale factorului de multiplicare sunt prezentate în *Tabelul 1*.

Tabelul .1

Nivelul de încredere și riscul

q	2/3	1	2	3	4
N[%]	50	68.3	95.5	99.73	99.98
R[%]	50	31.7	4.5	0.27	0.02

Pentru măsurări curente se adoptă $N=95.5\%$.

Abaterea standard a mediei va avea forma:

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-16)$$

Eroarea introdusă asupra mediei se calculează cu relația:

$$\Delta \bar{X} = \pm \frac{q \sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-17)$$

Rezultatul măsurării se exprimă sub una dintre următoarele forme:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X_{\max}, \quad (1-18)$$

$$X = \bar{X} \pm \Delta \bar{X}, \quad (1-19)$$

$$X = \bar{X} \pm \sqrt{(\Delta X_{\max})^2 + (\Delta \bar{X})^2} . \quad (1-20)$$

Distribuția Student. Se utilizează pentru un număr redus de măsurări și presupune utilizarea parametrilor *media aritmetică* și *erorile individuale*, similar distribuției *Gauss*. Estimația S a abaterii standard experimentale se calculează folosind expresia:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n-1}} . \quad (1-21)$$

Estimarea abaterii standard experimentală a mediei va avea forma:

$$S(\bar{X}) = \pm \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1-22)$$

Incertitudinea de tip A , a măsurării mărimii X determinată pe baza a n observații repetate este dată de estimarea abaterii experimentale a mediei.

$$u = u(X) = S(\bar{X}) = \pm \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1-23)$$

Eroarea maximă introdusă asupra unui rezultat individual depinde de parametrul t conform nivelului de încredere adoptat.

$$\Delta X_{\max} = \pm tS \quad (1-24)$$

Valorile parametrului t sunt prezentate în *Tabelul 2*:

Tabelul 2

Valorile parametrului t

N	0,683	0,900	0,950	0,955	0,990
n=9	1.07	1.86	2.31	2.38	3.36
n=10	1.06	1.83	2.26	2.33	3.25
n=17	1.03	1.74	2.12	2.17	2.92
∞	1.00	1.64	1.96	2.00	2.58

Eroarea introdusă asupra mediei, care reprezintă incertitudinea de măsurare extinsă, se calculează cu relația:

$$\Delta(\bar{X}) = \pm \frac{tS}{\sqrt{n}} . \quad (1-25)$$

Rezultatul măsurării se exprimă sub una dintre următoarele forme prezentate la distribuția *Gauss*

Propagarea erorilor aleatorii. În cazul măsurătorilor indirecte în care $X = f(A, B, C, \dots)$ unde A, B și C sunt măsurate direct printr-un șir de n observații, rezultatul se calculează: $\bar{X} = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots)$. Abaterea standard se calculează prin:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \dots + 2\rho_{AB} \frac{\partial f}{\partial A} \frac{\partial f}{\partial B} \sigma_A \sigma_B + \dots} \quad (1-26)$$

unde $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$ – sunt abaterile standard ale variabilelor A, B, C ;

$\delta_{AB}, \delta_{AC}, \delta_{BC}$ – sunt coeficienți de corelație.

Dacă variabilele aleatorii A, B, C sunt complet independente, atunci coeficienții de corelație sunt 0, iar dacă variabilele sunt puternic corelate, atunci coeficienții au valoarea 1.

Propagarea erorilor sistematice. În cazul măsurătorilor indirecte în care $X = f(A, B, C, \dots)$ unde A, B și C se măsoară direct cu erorile $\Delta A, \Delta B, \Delta C$, rezultă:

$$X + \Delta X = f(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, \dots). \quad (1-27)$$

Prezentarea rezultatului măsurării

În funcție de metoda de măsurare și de ponderea erorilor sistematice și aleatoare în eroarea totală, întâlnim următoarele situații:

Măsurări directe sau indirecte cu erori sistematice predominante. Se aplică în cazul mărimilor cu bună stabilitate în timp și este specifică măsurărilor de precizie medie și redusă. Rezultatul are forma:

$$X = X_{mas} \pm \Delta X \text{ sau } X = X_{mas} \pm \frac{\Delta X}{X} 100[\%]. \quad (1-28)$$

Măsurări directe cu erori aleatorii importante. În această categorie intră mărimile de măsurat ce prezintă fluctuații necontrolate: rezistența de contact, rezistența electrică a unui izolator etc, astfel încât erorile sistematice sunt neglijabile. Erorile aleatorii se calculează pe baza repartiției Student (eroarea asupra unui rezultat individual sau eroarea asupra mediei). Rezultatul măsurării se exprimă stabilindu-se un nivel de încredere asociat uzual cu $N=95\%$.

Măsurări directe de precizie. Eroarea totală rezultă din compunerea pătratică a erorii sistematice cu cea aleatoare:

$$\mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_{sistematica}^2 + \mathcal{E}_{aleatorie}^2}. \quad (1-29)$$

Aleatorizarea erorii sistematice. În cazul unei erori sistematice $\Delta X = \pm a$, se poate presupune că valorile lui X se află cu egală probabilitate în oricare punct al intervalului, implicând o distribuție rectangulară pentru care $\sigma = a / \sqrt{3}$, iar eroarea

sistematică aleatorizată se calculează cu relația $\Delta X = \pm t\sigma$, pentru $t \rightarrow \infty$, iar nivelul de încredere N are aceeași valoare ca și pentru eroarea aleatorie.

Măsurări indirecte, de precizie ridicată afectate de erori sistematice și aleatorii. Această situație este întâlnită în cazul determinării constantelor fizice. Se determină valoarea medie și abaterea standard σ sau aproximația acesteia S . Se stabilește un nivel de încredere N și se determina după tabel factorul de multiplicare q sau parametrul t . Se calculează eroarea aleatorie asupra mediei. Se determină eroarea sistematică aleatorizată. Se calculează eroarea totală prin compunerea pătratică a erorii sistematice cu eroarea aleatoare.

Deoarece în procesul de măsurare la acest caz intervin mai multe erori sistematice $\pm a_i$, provenite de la cele k mărimi independente, abaterea standard se va determina cu relația:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k a_i^2}{3}}, \quad (1-30)$$

dacă este îndeplinită condiția:

$$t\sigma < \sum_{i=1}^k a_i. \quad (1-31)$$

În caz contrar, din suma erorilor sistematice se extrage termenul predominant (să presupunem a_1) și se sumează liniar cu rezultanta celorlalți termeni. Astfel, eroarea sistematică se va estima utilizând expresia:

$$\Delta X = \pm \left(a_1 + t \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^k a_i^2}{3}} \right). \quad (1-32)$$

Capitolul 2

Măsurarea tensiunii și curentului continuu și alternativ

Instrumente analogice

Instrumentul magnetoelectric cu magnet exterior

Constructiv, instrumentele magnetoelectrice cu magnet permanent exterior sunt alcătuite dintr-o bobină mobilă susținută de arcurile elicoidale, care se poate roti în întrefierul unui circuit magnetic, *Figura 2.1*. Circuitul magnetic este format din piesele polare ale unui magnet permanent și miezul cilindric feromagnetic. Aparatul este prevăzut cu un dispozitiv indicator solidar cu axul bobinei mobile.

Bobina mobilă este realizată din conductor de cupru emailat, bobinat pe un cadru de aluminiu. Cadrul servește și la amortizarea oscilațiilor prin intermediul curenților induși în spira în scurtcircuit pe care acesta o realizează. Arcurile elicoidale pe lângă funcția de formare a cuplului rezistent, realizează și alimentarea electrică a bobinei.

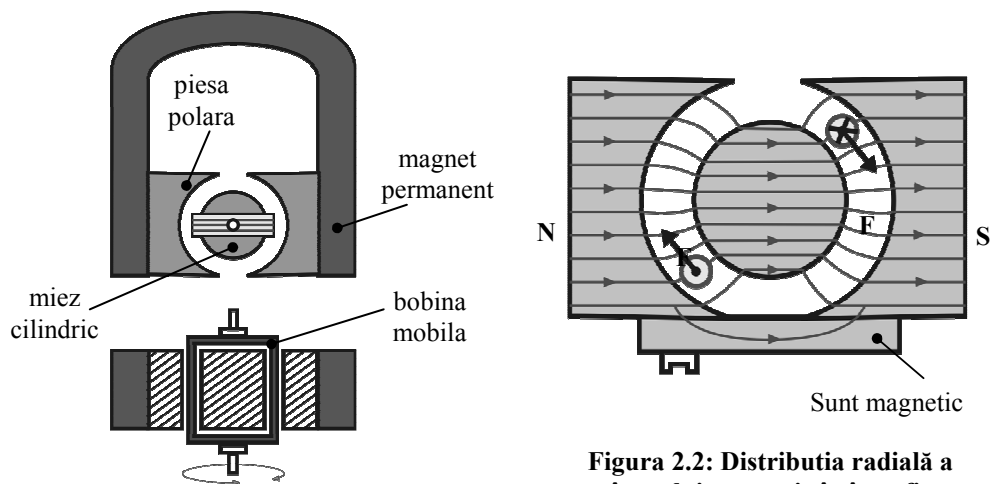


Figura 2.1: Dispozitivul magnetoelectric cu magnet exterior

Figura 2.2: Distribuția radială a câmpului magnetic în întrefier

La conectarea instrumentului în circuit, bobina mobilă este parcursă de un curent continuu. Câmpul magnetic din întrefier acționează asupra curentului electric din bobină producând un cuplu activ care rotește bobina mobilă. Cuplului activ i se opune cuplul rezistent, care crește odată cu unghiul de rotire al părții

mobile ca urmare a tensionării și detensionării arcurilor spiralate. Sub acțiunea celor două cupluri, partea mobilă se rotește până în poziția în care cuplul activ devine egal cu cel rezistent și deviația instrumentului se stabilește la valoarea de regim permanent, apreciată prin numărul de diviziuni indicate de acul indicator.

Magnetul permanent se realizează din oțeluri speciale aliate cu aluminiu, nichel sau magneziu. Înainte de utilizare, magneții sunt supuși unui tratament de îmbătrânire forțată care să asigure o valoare constantă în întregul a inducției. Piese polare și miezul cilindric se realizează din material feromagnetic cu o foarte mare permeabilitate magnetică, de obicei din fier moale. Intrefierul rezultat între miezul cilindric și piesele polare trebuie să fie uniform astfel încât inducția magnetică să păstreze o valoare constantă.

Piese polare sunt prevăzute cu un șunt magnetic realizat dintr-o plăcuță din fier moale prin care se derivă o parte din fluxul magnetic. Prin modificarea poziției șuntului prin intermediul unui șurub, se reglează fluxul magnetic din întregul astfel încât curentului nominal să-i corespundă deviația maximă a indicatorului, *Figura 2.2*. Dacă reglajul poziției de zero se realizează mecanic cu ajutorul dispozitivului corector de zero, poziția de deviație maximă se reglează magnetic prin intermediul șuntului.

Bobina mobilă este de secțiune dreptunghiulară, având patru laturi dintre care doar două fiind active, cele care sunt perpendiculare pe liniile câmpului magnetic. Deoarece magneții permanenți se construiesc din materiale dure, prelucrarea acestora este dificilă. Acest inconvenient se rezolvă prin utilizarea unor geometrii constructive simple și completarea circuitului magnetic cu elemente din fier moale, ușor prelucrabil.

Aparate cu instrument magnetoelectric

Instrumentul magnetoelectric în schemă de ampermetru. Conectarea unei rezistențe șunt în paralel cu instrumentul magnetoelectric conduce la obținerea unui aparat de măsură de tip ampermetru. La bornele acestuia se va putea măsura o valoare a curentului mai mare decât cea măsurată de instrumentul magnetoelectric de bază.

În *Figura 2.3* se prezintă schema instrumentului magnetoelectric în configurație de ampermetru.

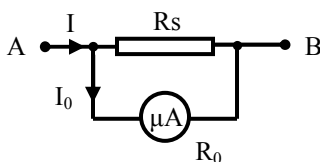


Figura 2.3: Ampermetrul magnetoelectric

Notățiile din schemă au următoarele semnificații:

μA – instrumentul magnetoelectric de bază;

R_0 – rezistența instrumentului magnetoelectric de bază (constituită din rezistența bobinei mobile și rezistența necesară compensării erorii de temperatură);

I_0 – curentul prin instrumentul magnetoelectric de bază;

R_S – rezistența șuntului;

A, B – bornele noului instrument de măsură realizat, de tip ampermetru;

I – curentul de măsurat (care trece prin ampermetru).

Calcularea valorii rezistenței șuntului se realizează ținând cont de faptul că avem aceeași cădere de tensiune atât pe rezistența șunt cât și pe rezistența internă a instrumentului magnetoelectric. Astfel:

$$I_0 R_0 = (I - I_0) R_S. \quad (2-1)$$

$$R_S = \frac{I_0 R_0}{I - I_0} = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1}. \quad (2-2)$$

Se poate observa că pentru a extinde domeniul de măsurare în curent a instrumentului magnetoelectric este necesar introducerea în paralel cu acesta a unei rezistențe șunt cu valoare mai mică decât cea a bobinei mobile.

Instrumentul magnetoelectric în schemă de voltmetru. Instrumentul magnetoelectric poate măsura o tensiune relativ mică, cel mult egală cu căderea de tensiune pe rezistența proprie R_0 produsă de curentul prin instrument I_0 , respectiv: $U_0 = R_0 I_0$. Conectarea unei rezistențe adiționale în serie cu instrumentul magnetoelectric conduce la obținerea unui nou instrument de măsură, de tip voltmetru. La bornele acestuia se va putea măsura o valoare a tensiunii mai mare decât cea măsurată de instrumentul magnetoelectric de bază.

În *Figura 2.4* se prezintă schema instrumentului magnetoelectric în configurație de voltmetru.

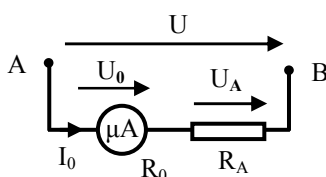


Figura 2.4: Voltmetrul magnetoelectric

Notățiile din schemă au următoarele semnificații:

μA – instrumentul magnetoelectric de bază;

R_0 – rezistența instrumentului magnetoelectric de bază (constituită din rezistența bobinei mobile și rezistența necesară compensării erorii de temperatură);

I_0 – curentul prin instrumentul magnetoelectric de bază;

R_A – rezistența adițională;

U_0 – căderea de tensiune pe instrumentul magnetoelectric de bază;

U_A – căderea de tensiune pe rezistența adițională;

U – tensiunea de măsurat;

A, B – bornele noului instrument de măsură realizat, de tip voltmetru.

Calcularea valorii rezistenței adiționale se realizează ținând cont de faptul că tensiunea de măsurat reprezintă suma căderilor de tensiune de pe rezistența internă a instrumentului și de pe rezistența adițională. Astfel:

$$U = U_0 + U_A; \quad (2-3)$$

$$I_0 R_A = U - U_0; \quad (2-4)$$

$$R_A = \frac{U - U_0}{I_0} = \frac{\frac{U}{U_0} - 1}{\frac{I_0}{U_0}}; \quad (2-5)$$

$$R_A = \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) R_0. \quad (2-6)$$

Instrumentul magnetoelectric cu redresor. În scopul utilizării instrumentului magnetoelectric și în curent alternativ, pe lângă utilizarea în curent continuu, aceasta se asociază cu scheme de redresare care îndeplinesc funcția de convertor curent alternativ – curent continuu.

Pentru realizarea redresoarelor se utilizează cu precădere diode cu germaniu cu contact punctiform. Diodele semiconductoare sunt dispozitive electronice constituite dintr-o joncțiune $p-n$ prevăzută cu contacte metalice și introdusă într-o capsulă din sticlă sau metal, caracterizându-se prin conductivitate unidirecțională. Funcționarea diodei este descrisă prin caracteristica de funcționare. Această caracteristică furnizează informații despre modul în care curentul prin diodă variază în funcție de tensiunea aplicată între terminalele acesteia. Caracteristica statică a diodelor cu contact punctiform este asemănătoare cu cea a diodelor cu joncțiune plană, cu deosebirea că în regiunea polarizării inverse curentul nu prezintă un palier, ci crește continuu cu tensiunea de polarizare inversă, *Figura 2.5*.

În funcție de polarizarea diodei, anod polarizat pozitiv sau negativ, respectiv catod polarizat negativ sau pozitiv, există două regimuri de funcționare: în conducție directă și în conducție inversă. În conducția directă (anod polarizat pozitiv) se remarcă existența unei tensiuni de prag, notată U_p . Dacă valoarea căderii de tensiune pe diodă este sub prag, prin diodă nu va circula curent electric (de fapt este foarte mic și poate fi aproximat ca fiind zero). Dacă valoarea tensiunii pe diodă atinge pragul, atunci prin diodă începe circulația curentului electric care va crește exponențial în funcție de tensiunea pe diodă. Curentul prin diodă nu trebuie să depășească o anumită valoare maximă, impusă de puterea maximă pe care o poate disipa dioda fără a se distruge termic. Limitarea curentului prin diodă la o valoare mai mică decât valoarea maximă este realizată de către circuitul în care este utilizată dioda, de obicei, prin intermediul unui rezistor.

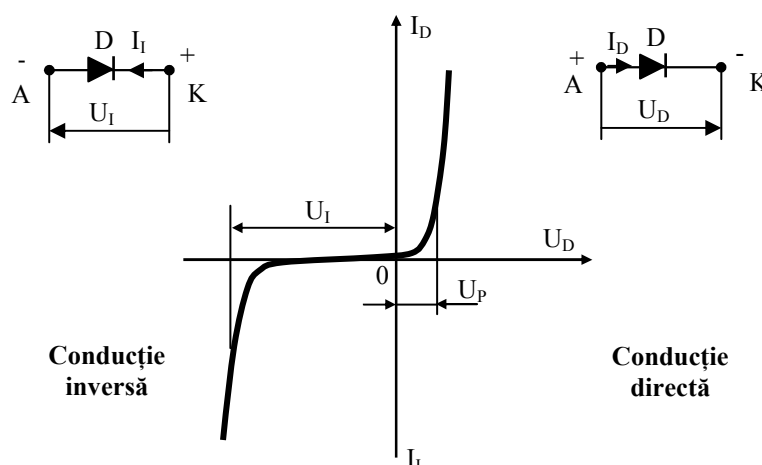


Figura 2.5: Caracteristica de funcționare pentru diode cu contact punctiform

În conducție inversă (anod polarizat negativ), se remarcă existența tensiunii de străpungere, notată U_I . Dacă valoarea în modul a tensiunii pe diodă este mai mică decât valoarea U_I , curentul electric nu circulă prin diodă (este foarte mic și poate fi aproximat ca fiind zero). Dacă valoarea tensiunii pe diodă atinge valoarea de străpungere, atunci prin diodă curentul electric crește necontrolat, conducând la distrugerea fizică a acesteia. Din acest motiv, este necesar ca circuitul în care este utilizată dioda să limiteze tensiunea negativă pe aceasta la valoare mai mică în modul decât valoare U_I . Schemele de redresare asociate cu instrumentul magnetoelectric sunt de tip bialternanță, deoarece acest ansamblu prezintă o sensibilitate dubla față de asocierea cu scheme de tip monoalternanță. În cazul schemelor bialternanță într-o perioadă a semnalului de măsurat trec două impulsuri pozitive de curent prin instrumentul de măsură magnetoelectric.

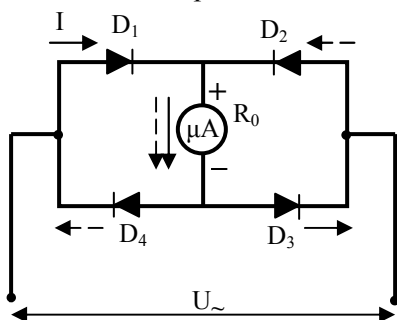


Figura 2.6: Punte Graetz

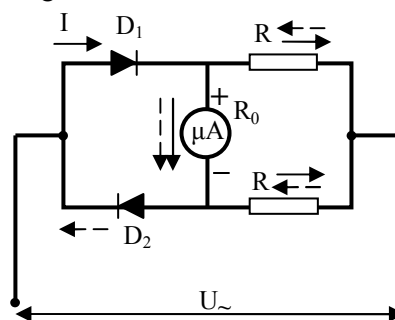


Figura 2.7: Punte jumătate Graetz

Schema de redresare cu 4 diode, Figura 2.6, este cunoscută sub numele de punte Graetz. În fiecare alternanță, bobina instrumentului este înseriată cu două diode. Schema de redresare cu două diode Figura 2.7, numită punte jumătate

Graëtz, derivă din puntea cu patru diode prin înlocuirea a două diode cu două rezistențe de valoare mult mai mare decât rezistența diodelor.

Deși deviația instrumentului magnetoelectric cu redresor este proporțională cu valoarea medie a curentului de măsurat etalonarea scalei se realizează în valori efective pentru un curent de formă sinusoidală.

Instrumentul feromagnetic

Instrumentele feromagnetice sunt realizate dintr-o bobină fixă, parcursă de curent electric și una sau mai multe plăcuțe din material feromagnetic, plasate în câmpul magnetic al bobinei. Plasarea plăcuțelor în câmpul bobinei are ca rezultat magnetizarea acestora. În aceste condiții, cuplul activ apare ca rezultat al interacțiunii câmpului magnetic al bobinei cu cel al plăcuțelor feromagnetice.

În funcție de forma constructivă și de natura forțelor care determina cuplul activ, aparatele feromagnetice se împart în următoarele categorii: cu atracție, la care piesa feromagnetică este atrasă spre interiorul bobinei; cu repulsie, la care cele două piese feromagnetice se resping între ele; cu atracție-repulsie, la care acționarea într-un sens a părții mobile se realizează prin exercitarea de forțe între plăcuțele feromagnetice, atât de atracție cât și de respingere.

Instrumentul feromagnetic cu atracție. Este alcătuit dintr-o bobină fixă cu secțiune dreptunghiulară plată și o plăcuță din material feromagnetic montată excentric pe axul aflat în exteriorul bobinei. De asemenea, aparatul mai este prevăzut cu dispozitiv de realizarea momentului rezistent, cu un dispozitiv pneumatic de amortizare și cu dispozitiv indicator, *Figura 2.8*.

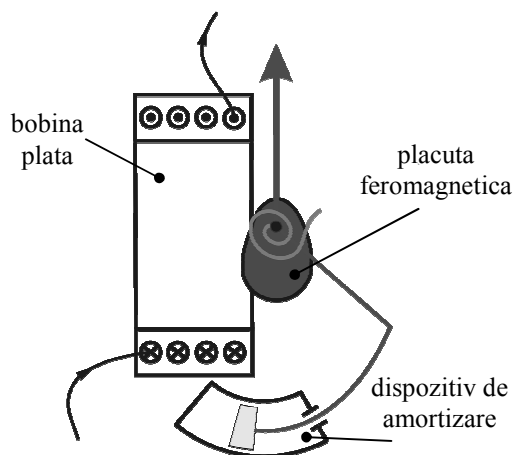


Figura 2.8: Instrument feromagnetic cu atracție

La alimentare, bobina este parcursă de curent electric și generează un câmp magnetic. Câmpul va magnetiza piesa feromagnetică și o va atrage către interiorul bobinei. Deoarece piesa este montată excentric pe ax, deplasarea acesteia spre

interiorul bobinei va determina apariția unui cuplu activ care va roti partea mobilă a aparatului. Cuplului activ i se va opune cuplul rezistent realizat de resortul spiralat.

Instrumentul electrodinamic

Instrumentul electrodinamic se bazează pe interacțiunea dintre câmpurile magnetice produse de două bobine parcurse de curent. O bobină este fixă și compusă din două secțiuni identice, coaxiale iar a doua este mobilă. Bobina mobilă se poate roti în interiorul bobinei fixe și este rigidizată pe axul aparatului. Caracteristic acestui tip de aparat este lipsa elementelor feromagnetice, bobinele fiind cu aer.

Bobinele pot fi conectate între ele fie în serie fie în paralel. Cuplul activ se realizează pe baza interacțiunii câmpurilor magnetice generate de cele două bobine, când acestea sunt parcurse de curent electric. Bobina mobilă tinde prin rotire să-și alinieze liniile de câmp pe direcția liniilor de câmp ale bobinei fixe.

Constructiv există două variante: cu câmp axial la care bobinele fixe sunt apropiate și au dimensiunea axială mare astfel încât câmpul interior să poată fi considerat axial și uniform, și cu câmp radial la care bobinele fixe sunt îndepărtate și au dimensiunea axială mică astfel încât câmpul interior să poată fi considerat radial și uniform, *Figura 2.9*.

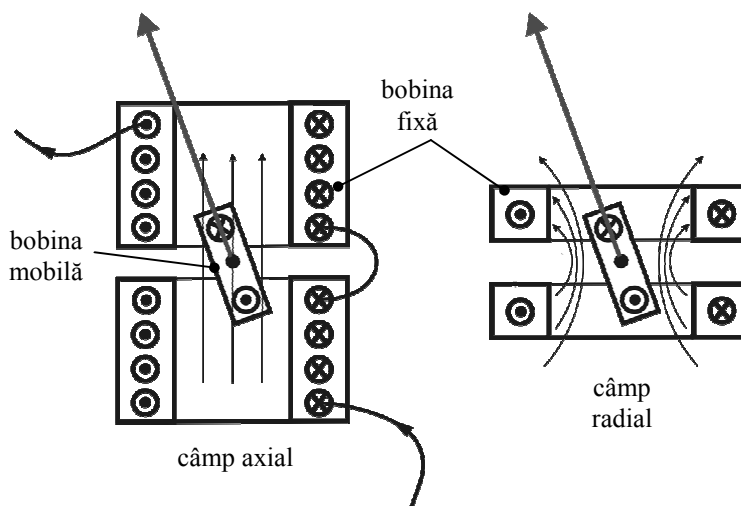


Figura 2.9: Instrumentul electrodinamic

Instrumentul ferodinamic

Instrumentul ferodinamic are o construcție similară celui electrodinamic cu deosebirea că în această situație circuitul magnetic este format în cea mai mare

parte din material feromagnetic. Materialul feromagnetic utilizat este de tip tole de transformator sau de pulberi feromagnetice presate, astfel încât să se realizeze o reducere a pierderilor prin histerezis și prin curenți turbionari.

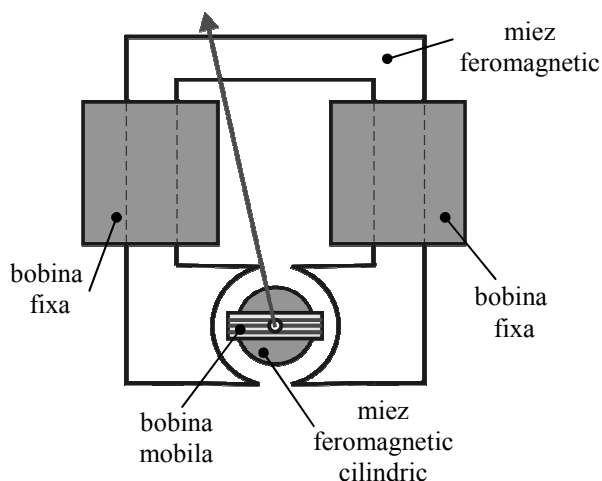


Figura 2.10: Instrument ferodinamic

Miezul feromagnetic, de care este prinsă bobina fixă, prezintă un întrefier cilindric și îngust în interiorul căruia se poate roti bobina mobilă, *Figura 2.10*. Bobina mobilă se realizează fără suport pentru a se împiedica inducerea curenților turbionari în acesta. Producerea cuplului activ se bazează pe interacțiunea dintre câmpul magnetic produs în întrefier de bobina fixă și cel produs de bobina mobilă la parcurgerea acestora de curent electric.

Voltmetre numerice

Voltmetrul cu aproximații succesive

Structura de bază a voltmetrului cu aproximații succesive este alcătuită dintr-un comparator C , un convertor numeric-analogic CN/A , un circuit logic CL și un registru numeric RN .

Principiul de funcționare se bazează pe executarea unor cicluri succesive de comparații (aproximări) ale valorii tensiunii de măsurat cu o tensiune de referință, fapt care conduce la înjumătățiri succesive ale domeniului de măsurare. Tensiunea de referință este modificată în cadrul fiecărui ciclu, crescător sau descrescător, astfel încât să se apropie din ce în ce mai mult de valoarea tensiunii de măsurat. Modificarea valorii tensiunii de referință comandată de circuitul logic se realizează ținând cont de rezultatului comparației furnizat de către comparator, *Figura 2.11*.

La intrarea comparatorului se aplică tensiunea analogică de măsurat U_X și tensiunea de referință U_R generată inițial la o valoare egală cu jumătate din valoarea maximă a convertorului N/A . Comparatorul stabilește care dintre aceste

două valori de tensiune este mai mare și prin intermediul convertorului N/A se generează o nouă tensiune de referință care să se apropie mai mult de valoarea tensiunii de măsurat. Variația valorii tensiunii de referință este egală cu jumătate din valoarea acesteia din ciclul precedent. Numărul ciclurilor în care se realizează aproximarea tensiunii de măsurat este egal cu numărul de biți al convertorului N/A .

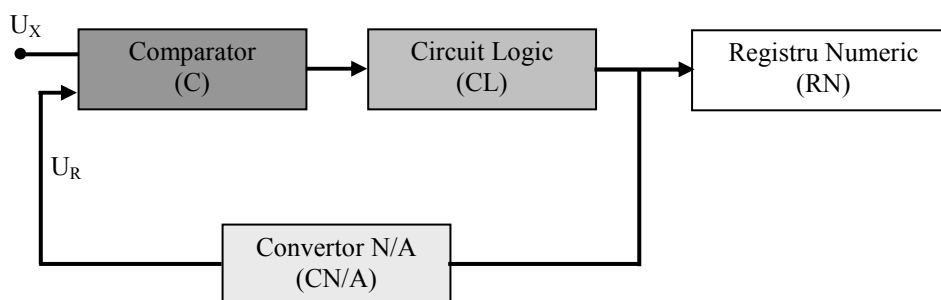


Figura 2.11: Diagrama bloc a voltmetrului cu aproximații succesive

Pentru exemplificarea funcționării voltmetrului cu aproximații succesive se considera următorul exemplu. Se considera că tensiunea de măsurat are valoarea de $7V$ iar convertorul N/A este pe 8 biți și are tensiunea maximă de $10V$.

Principiul funcționării voltmetrului este asemănător cu cel al unei balanțe, la care operația de cântărire se realizează prin adăugări succesive de greutăți pe platanul acesteia.

În cadrul primului ciclu, tensiunii de măsurat de $7V$ este comparată cu tensiunea de referință egală cu jumătate din domeniul convertorului N/A adică $5V$ (similar cu prima greutate pusă pe platan). Această tensiune (greutate) fiind mai mică decât $7V$ va fi reținută. Pentru cel de-al doilea ciclu se utilizează drept tensiune de referință valoarea reținută în pasul anterior la care se adaugă jumătatea acesteia. Astfel, comparatorului i se aplică valoarea de $(5+2.5)V$. Deoarece $7.5V$ este mai mare decât $7V$, tensiunea (greutatea) de $2.5V$ nu se păstrează. Pentru ciclul al treilea, jumătatea variației tensiunii din ciclul anterior este $1.25V$. Se va aplica comparatorului tensiunea de referință de $(5+1.25)V$. De aceasta dată, $6.25V$ fiind o tensiune mai mică decât $7V$ se păstrează tensiunea de $1.25V$. Algoritmul se continuă pentru un număr de cicluri egal cu cel al numărului de biți al convertorului N/A . Valoarea măsurată a tensiunii va fi egală cu suma tuturor tensiunilor reținute.

Fiecărui ciclu în care tensiunea este reținută i se atribuie valoarea 1 binar iar fiecărui ciclu în care tensiunea nu a fost reținută i se atribuie 0 binar.

După parcurgerea întregului algoritm, codul numeric al valorii de tensiune măsurate este exprimat de șirul valorilor binare alocate fiecărui ciclu în parte ca urmare a păstrării sau nu, a valorilor tensiunii de referință.

Voltmetrul cu rampă liniară

Funcționarea voltmetrului cu rampă liniară se bazează pe generarea unei tensiuni variabile în timp sub formă de rampă și măsurarea timpului în care această tensiune ajunge la valoarea tensiunii de măsurat.

Schema bloc, *Figura 2.12*, a voltmetrului conține următoarele componente:

- generatorul de rampă GR , care generează o tensiune liniar variabilă și simetrică față de zero (tensiunea masei), între limitele $-U$ și $+U$;
- două comparatoare de tensiune CT_1 și CT_2 care compară tensiunea în rampă cu tensiunea de măsurat și cu tensiunea zero (masă);
- un circuit de control logic CL cu rol în comanda porții P ;
- un generator de impulsuri dreptunghiulare GI ;
- un numărător N .

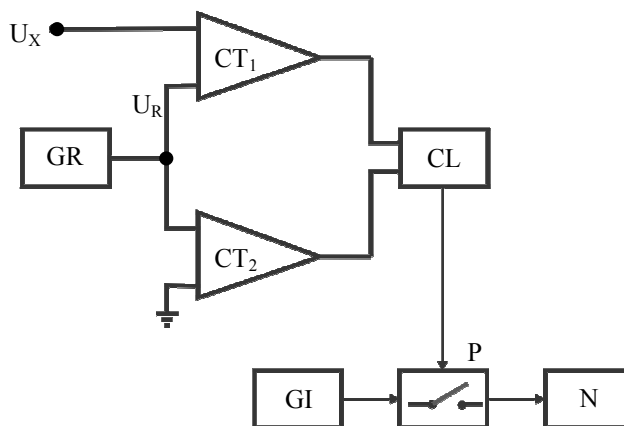


Figura 2.12: Voltmetrul cu rampă liniară. Schema bloc

În mod periodic generatorul de rampă generează o tensiune liniară crescătoare în timp. În momentul în care tensiunea rampă trece prin zero, comparatorul CT_2 transmite un semnal către circuitul logic care comandă deschiderea porții. Din acest moment prin poartă trec spre numărător impulsurile generate de către generatorul de impulsuri. Tensiunea rampă continuă să crească iar în momentul în care aceasta o egalează pe tensiunea de măsurat, comparatorul CT_1 transmite un semnal către circuitul logic care comandă închiderea porții. Numărul de impulsuri care trec prin poartă va fi proporțional cu valoarea tensiunii de măsurat.

Voltmetrul cu rampă variabilă

Principiul de funcționare al voltmetrului cu rampa variabilă se bazează pe numărarea impulsurilor care trec prin poartă în condițiile în care timpul de deschidere al acestei nu este dependent de tensiunea de măsurat. Constructiv, după cum se observă în *Figura 2.13*, voltmetrul este alcătuit din următoarele componente:

- un amplificator integrator AI care generează la ieșire o tensiune variabilă în rampă, de semn opus tensiunii de măsurat. Panta rampei depinde de tensiunea de măsurat, aplicată la intrarea amplificatorului;
- două comparatoare de tensiune CT_1 și CT_2 care compară tensiunea în rampă $U_R(t)$ cu tensiunile de referință $-U$ și $+U$;
- un circuit de control logic CL care comandă timpul de deschidere al porții P ;
- un generator de impulsuri dreptunghiulare comandat de către comparatoare care transmit impulsuri către numărător N .

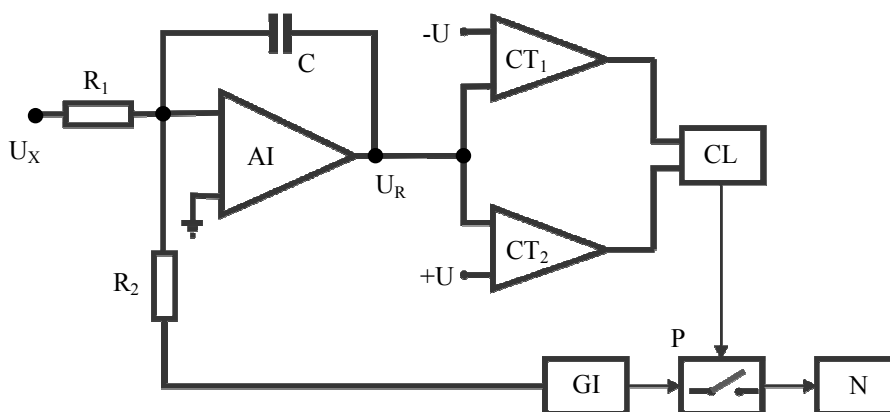


Figura 2.13: Voltmetrul cu rampă variabilă. Schema bloc

Aplicarea unei tensiuni de măsurat U_x la intrarea amplificatorului integrator va avea ca efect deschiderea porții pentru un interval determinat T_p , și generarea unei tensiuni în rampă $U_R(t)$ prin intermediul amplificatorului integrator. Când nivelul tensiunii în rampă atinge tensiunea de referință $-U$, comparatorul CT_1 transmite un semnal către generatorul de semnal. Generatorul de semnal transmite un impuls rectangular către intrarea amplificatorului, prin R_2 , care are ca efect aducerea în zero a tensiunii $U_R(t)$ și de asemenea transmite și un impuls prin poarta către numărător.

Numărul de impulsuri care străbat poarta în intervalul de timp T_p de deschidere al acesteia (interval de timp impus de circuitul de control logic) este proporțional cu tensiunea de măsurat.

Fixarea duratei T_p ca un multiplu al perioadei tensiunii alternative de rețea permite eliminarea la maximum a fundamentalei și a armonicilor acesteia (eliminarea zgomotului de rețea).

Voltmetrul cu rampă dublă

Principiul de funcționare constă în încărcarea unui condensator de către tensiunea de măsurat pe durata unui interval de timp, impus, T_l și descărcarea acestuia într-un interval de timp T_x proporțional cu valoarea tensiunii de măsurat.

Constructiv, *Figura 2.14*, voltmetrul este alcatuit din următoarele componente:

- un amplificator integrator *AI* care generează la ieșire o tensiune variabilă în rampă, de semn opus tensiunii de măsurat. Panta rampei depinde de tensiunea de măsurat, aplicată la intrarea amplificatorului;
- un comparator de tensiune *CT* care compară tensiunea în rampa $U_R(t)$ cu tensiunea de zero (masa);
- un circuit de control logic *CL*;
- un generator de impulsuri dreptunghiulare care transmite impulsuri către numărător *N*.

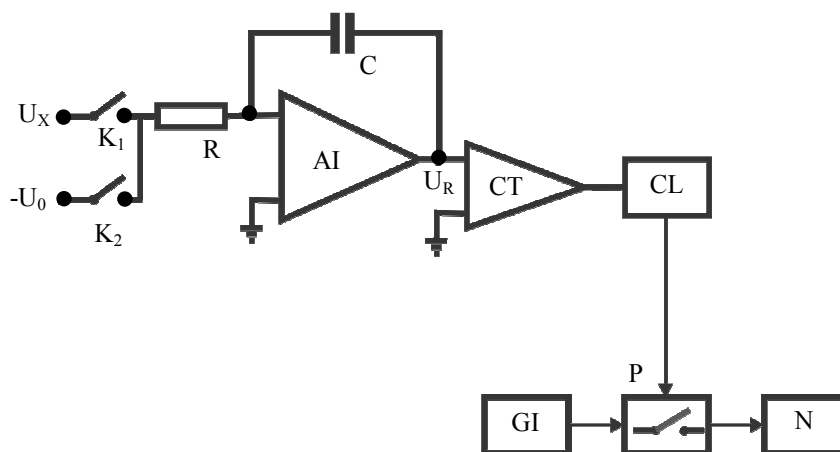


Figura 2.14: Voltmetrul cu rampă dublă. Schema bloc

Funcționarea voltmetrului se realizează după două rampe diferite *OA* și *AB*, *Figura 2.15*.

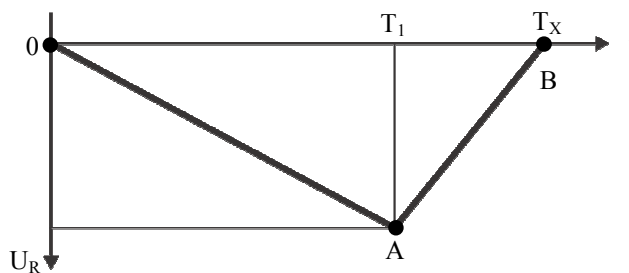


Figura 2.15: Voltmetrul cu rampă dublă. Diagrama de funcționare

Rampa *OA* este parcursă în intervalul de timp impus T_1 . Circuitul de control logic închide întrerupătorul K_1 prin care se conectează tensiunea de măsurat la intrarea integratorului, determinând încărcarea condensatorului. Tensiunea de la

ieșirea integratorului $U_R(t)$ crește în rampă. Imediat după depășirea valorii de zero a tensiunii, comparatorul generează un impuls care comandă deschiderea porții. Impulsurile trec prin poartă în intervalul impus T_I , în care se atinge la numărător valoarea maximă după care se închide poarta și se aduce la zero numărătorul.

Rampa AB este parcursă în timpul T_x . Circuitul logic deschide K_1 , închide K_2 simultan cu deschiderea porții. Prin închiderea lui K_2 se conectează la intrarea integratorului a unei tensiuni de referință negativă $-U_0$, determinând descărcarea condensatorului. Când tensiunea $U_R(t)$ atinge valoarea de zero, comparatorul închide poarta.

Numărul impulsurilor care trec prin poartă în intervalul de timp T_x , este proporțional cu tensiunea de măsurat, aplicată la intrarea integratorului. Fixarea timpului de integrare T_I ca un multiplu al perioadei tensiunii alternative de rețea permite eliminarea la maximum a fundamentalei și a armonicilor acesteia.