

12. | MASURAREA IMPEDANTEI

Parametrii de circuit electric R , X , si Z reprezinta marimi ce caracterizeaza proprietatile unor elemente de circuit (rezistoare, bobine, condensatoare) de a disipa sau absorbi energie electromagnetica sub diferite forme (caldura, energie electrica sau magnetica) si la valori care depind de constructia elementului, de curentul electric (prin frecventa, amplitudine, forma de unda), precum si de alti factori de mediu (temperatura, presiune s.a.). Din aceste cauze, parametrii mentionati au valori determinate de conditiile de lucru ale elementelor, masurarea trebuind sa fie facuta în acele conditii sau în conditii apropiate. Astfel, în curent continuu se masoara rezistenta electrica a rezistoarelor si a bobinelor (la temperatura ambianta sau la temperaturi superioare, produse de exemplu de regimul de functionare la un anumit curent) sau rezistentele de izolatie si rezistentele dielectricilor condensatoarelor. În curent alternativ (de obicei sinusoidal) se masoara impedanta si componentele sale (modulul si argumentul sau partea reala si partea imaginara) pentru bobine si condensatoare. Bobinele cu miez feromagnetic având rezistenta si reactanta mai mari decât cele fara fier, necesita masurarea în conditii de functionare, iar la condensatoarele electrolitice de filtraj masurarea se face cu tensiune continua de polarizare suprapusa peste cea alternativa. Prezentarea rezultatelor masurarii (în coordonate rectangulare sau polare, în procente etc.) precum si modul de afisare (analogic, digital, prin înregistrare etc.) trebuie realizate astfel încât sa fie sugestive pentru masurarea respectiva.

Ca urmare, s-a dezvoltat o varietate foarte mare de aparate pentru masurarea impedantei, a caror clasificare este îngreunata si de faptul ca unele cauta sa fie cât mai universale, pe când altele sunt foarte specializate.

12.1. MASURAREA REZISTENTEI ELECTRICE PRIN METODE DIRECTE

Se realizeaza cu un aparat, cu sursa proprie de activare, care poarta numele generic de **ohmmetru** si care – pe baza anumitor conversii – indica direct rezistenta electrica a elementului de circuit supus masurarii, în ohmi (uneori în miliohmi sau kiloohmi, Megohmi, Teraohmi etc.).

12.1.1. Ohmmetre

Principiul de functionare a acestor aparate se bazeaza pe aplicarea legii lui Ohm, cu expresia ei cea mai simpla $R = \frac{U}{I}$, într-un circuit format dintr-un aparat indicator de masurat curentul, o sursa de curent continuu si rezistorul pasiv a carui rezistenta se masoara. Aparatul este gradat direct în ohmi, cunoscut fiind faptul ca într-un circuit, ca cel de mai sus, daca tensiunea sursei de alimentare a lui este constanta, valoarea curentului din acest circuit variaza invers proportional cu rezistenta de masurat.

Ohmmetrele sunt compuse dintr-un microampermetru sau miliampermetru cu bobina mobila, rezistoare aditionale variabile si o baterie uscata de curent continuu cu t. e. m. nominala de 1,5 la 4,5 V.

La aceste aparate apare, în timp, scaderea tensiunii la borne a sursei de alimentare atasate lui, deoarece odata cu îmbatrânirea sursei creste rezistenta ei interna. Pentru a mentine precizia de masurare în aceleasi limite, se procedeaza la compensarea acestei cresteri a rezistentei prin modificarea valorii rezistentei aditionale variabile R_a , asa fel încât suma rezistentei acesteia si a bateriei sa ramâna constanta.

În afara de aceasta functie, rezistoarele aditionale, montate în serie sau în paralel cu aparatul indicator, pe care le au în dotare ohmmetrele, sunt necesare pentru extinderea domeniului lor de masurare.

Dupa modul de conectare a rezistentei de masurat R_x fata de aparatul indicator exista ohmmetre cu montaj serie si cu montaj paralel.

Ohmmetrul serie (fig. 12.1.a). Schema lui este astfel alcatuita încât permite legarea rezistorului, a carui rezistenta R_x trebuie masurata, în serie cu aparatul indicator.

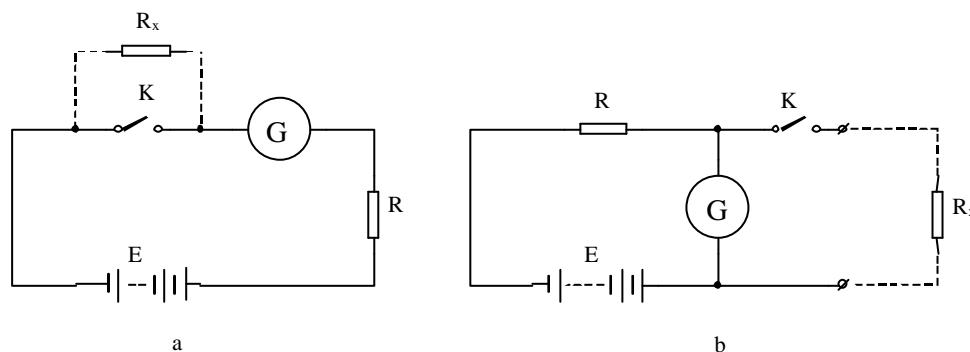


Fig. 12.1

Din aceasta cauza, când R_x este egala cu zero (bornele ohmmetrului scurtcircuitate) acul indicator al aparatului se va deplasa pâna la gradatia maxima a scarii, iar daca R_x are valoarea maxima ($R_x = \infty$), adica aparatul neconectat în circuit, acul indicator al aparatului nu se va deplasa deloc, pentru ca nu exista

curent în aparat. Rezulta deci ca deviatia aparatului este cu atât mai mica cu cât rezistenta de masurat este mai mare.

Scara acestui aparat este neuniforma, diviziunile ei fiind mai dese în zona valorilor mari ale rezistentelor (deci la începutul scarii).

Corectia ohmmetrului serie se face prin scurtcircuitarea bornelor la care se conectează rezistenta de masurat (închiderea întreruptorului K din figura 12.1,a), urmată de reglarea rezistenței aditionale sau a suntului magnetic până se aduce acul indicator la gradatia zero.

Ohmmetrul serie este utilizat pentru masurarea rezistentelor mari, cu valori peste $10^5 \Omega$.

Ohmmetrul paralel (fig. 12.1,b) este astfel realizat încât rezistorul a cărui rezistență R_x trebuie măsurată se conectează din exterior în paralel cu aparatul indicator. În acest caz, deviatia acului urmărește creșterea valorii absolute a rezistenței de masurat, deplasându-se de la stânga la dreapta.

Corectia acestui aparat se face în gol, adică atunci când nu are conectat nimic la borne (cu întreruptorul K deschis – fig. 12.1,b), aducându-se acul indicator la diviziunea 8. Așa se procedează înaintea fiecărei utilizări.

Ohmmetrul paralel este utilizat pentru masurarea rezistentelor mici și mijlocii, adică cu valori cuprinse între 10Ω și $10^5 \Omega$.

12.1.2. Ohmmetre digitale

Ohmmetrele digitale sunt, de obicei, încorporate în multimetre digitale, deoarece acestea au în componența lor etaje digitale pentru măsurarea tensiunii.

În general, se utilizează două principii de realizare a ohmmetrelor digitale: prin măsurarea caderii de tensiune pe rezistorul R_x (fig. 12.2,a), sau prin conectarea rezistorului R_x în bucla de reacție a unui amplificator operațional (fig. 12.2,b).

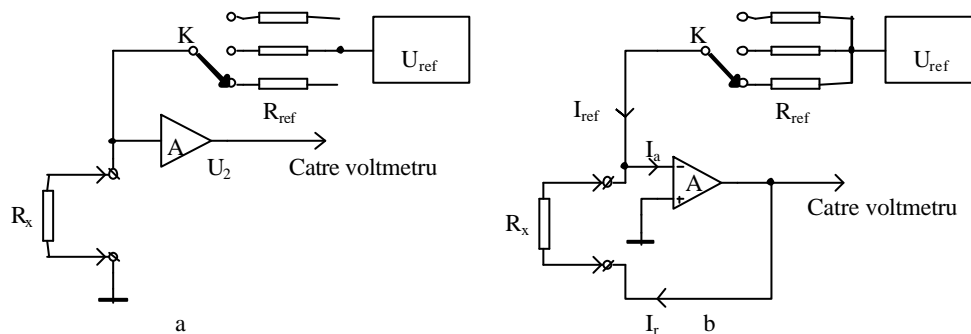


Fig. 12.2

Schema din figura 12.2,a utilizează o sursă de curent constant, care debitează pe rezistorul de măsurat R_x . Caderea de tensiune pe R_x este amplificată de amplificatorul operațional A, a cărui tensiune de ieșire este măsurată de un voltmetru digital. Gamele de măsurare sunt obținute prin comutarea rezistoarelor

R_{ref} de reactie ale amplificatorului A (care modifica amplificarea în tensiune a acestuia în rapoartele 1/1, 1/10 și 1/100) și prin schimbarea curentului generat de sursa.

Pentru schema din figura 12.2**b**, intrarea în amplificator având o rezistență foarte mare: $I_a \ll \min\{I_{ref}, I_r\}$ și atunci relația între curenți, la borna de intrare, $I_{ref} + I_r - I_a = 0$, se poate scrie $I_{ref} + I_r \approx 0$, adică $I_{ref} = -I_r$.

Deoarece:

$$I_{ref} = \frac{U_{ref}}{R_{ref}} \quad \text{și} \quad I_r = \frac{U_2}{R_x},$$

rezulta:

$$\frac{U_{ref}}{R_{ref}} = -\frac{U_2}{R_x},$$

adică:

$$R_x = R_{ref} \frac{U_2}{U_{ref}} \quad \text{sau} \quad U_2 = \frac{U_{ref}}{R_{ref}} \cdot R_x = k R_x. \quad (12.1)$$

Deci, tensiunea U_2 , măsurată cu un voltmetru digital, este astfel proporțională cu R_x . Acest circuit de măsurare este practic insensibil la orice rezistență parazită între bornele rezistorului R_x și masă. Aceste rezistențe apar în paralel pe intrarea amplificatorului, respectiv pe ieșirea lui; nici una dintre ele – dacă nu au valori excesiv de mici (practic sub 1 k Ω) – nu influențează măsurarea. Se realizează astfel o măsurare în conexiune tripolară, avantajoasă în cazul măsurării rezistențelor de valori mari.

O variantă perfecționată este reprezentată în figura 12.3. Aici, reacția negativă a amplificatorului A_1 este realizată prin intermediul amplificatorului A_2 , conectat ca repetor.

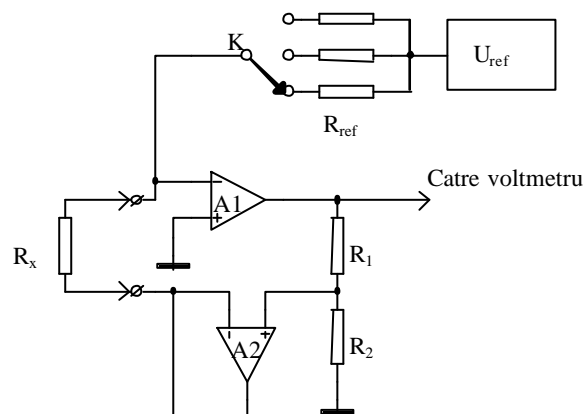


Fig. 12.3

În acest fel, potentialul bornei de tensiune a rezistorului R_x este practic identic cu potentialul jonctiunii rezistorilor R_1 , R_2 si este eliminat efectul oricarei rezistente de conexiune. La cealalta parte, rezistenta conexiunii are un efect neglijabil, fiind în serie cu rezistorul R_{ref} , de valoare suficient de mare (de obicei de cel puțin 10 k Ω). Gamele de masurare se obtin prin comutarea rezistoarelor R_{ref} si a raportului de divizare $R_2/(R_1 + R_2)$. De exemplu, cu $U_{ref} = 1$ V; $R_{ref} = 10$ k Ω ; 100 k Ω ; 1 M Ω si 10 M Ω si $R_2/(R_1 + R_2) = 1; 0,1$ si $0,01$ cu $U_2 = 0 \dots 1$ V, rezulta 6 game de masurare: de la 0 la 100 Ω pâna la 0 la 10 M Ω . Aceasta varianta nu este influentata de rezistente parazite fata de masa, iar masurarea este independenta de rezistentele conexiunilor. Astfel, se realizeaza o veritabila masurare în conexiune pentapolară.

O problema practica importanta la ohmmetrele digitale este protectia circuitului de intrare împotriva supratensiunilor si supracurentilor, pentru cazul accidental al prezentei unei surse în circuitul supus masurarii. Protectia împotriva supratensiunilor se face de obicei cu doua diode cu siliciu în paralel la intrarea amplificatorului, doua diode Zener în serie la iesirea amplificatorului si cu sigurante fuzibile în serie cu R_x (v. cap. 2).

Ohmmetrele digitale au o precizie de masurare între 0,01% si 0,5%, pentru rezistente între 1 Ω si 10 M Ω . Curentul prin rezistorul de masurat variaza între 100 mA (pentru rezistente mici) si 0,1 μ A (pentru rezistente mari).

12.2. MASURAREA REZISTENTEI ELECTRICE PRIN COMPARATIE

Dupa cum se stie (v. cap. 1), metoda comparatiei este o metoda de masurare foarte precisa, în special în cazul rezistentelor de valori mici, în care se compara doua rezistente de valori nu prea departate, R_0 si R_x conectate fie în serie, fie în paralel (fig. 12.4). În figura 12.4,a se foloseste un voltmetru care masoara succesiv tensiunea U_x la bornele rezistentei R_x si U_0 la bornele rezistentei R_0 (cunoscuta), curentul fiind mentinut la aceeasi valoare $I = U_0/R_0 = U_x/R_x$ cu ajutorul reostatului R_h . Rezistenta R_x se determina cu formula:

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}, \quad (12.2)$$

exacta în cazul când $R_x = R_0$. În caz contrar, se comite o eroare sistematica de valoare:

$$\Delta R_x / R_x = (R_x - R_0) / (R_x + R_v), \quad (12.3)$$

unde R_v este rezistenta voltmetrului.

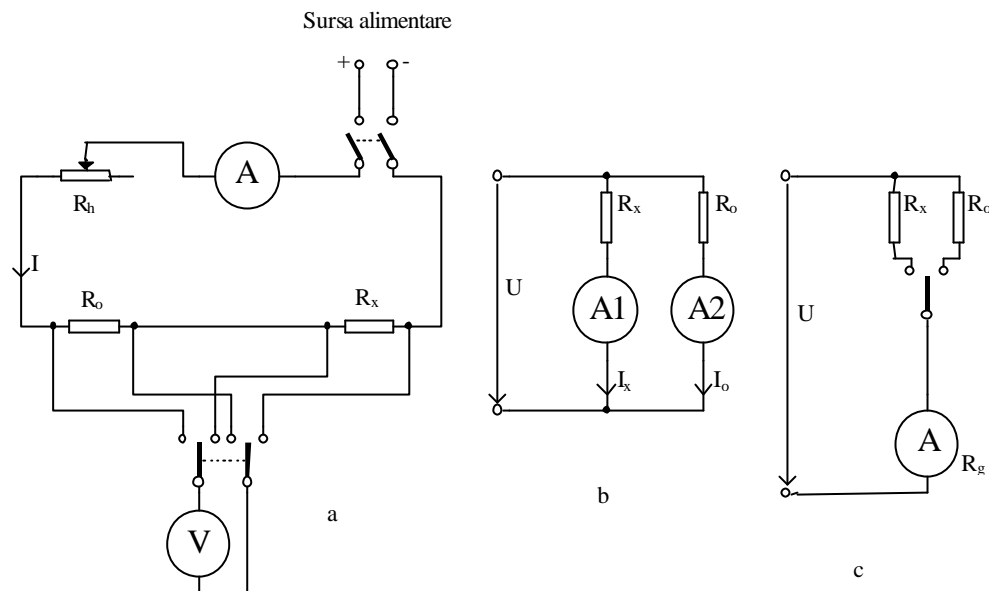


Fig. 12.4

Pentru montajul din figura 12.4,*b* masurarea rezistentei R_x se realizeaza cu ajutorul unei rezistente cunoscute R_0 si a doua ampermetre care masoara curentii I_0 si I_x , din cele doua rezistoare, la aplicarea tensiunii U . Rezistenta R_x se determina cu relatia:

$$R_x = R_0 \frac{I_0}{I_x}, \quad (12.4)$$

caci $U \cong R_x I_x \cong R_0 I_0$. Ea este exacta în cazul când rezistentele interioare ale ampermetrelor sunt mici în comparatie cu R_0 , respectiv R_x , caci, în fapt, $U = (R_x + R_{A_1}) I_x = (R_0 + R_{A_2}) I_0$.

În cazul rezistentelor mari, peste 1000 Ω , se poate folosi montajul din figura 12.4,*c* care utilizeaza un singur aparat de masurat, un mili sau micro-ampermetru, sau chiar un galvanometru magnetoelectric în cazul rezistentelor foarte mari, a carui scala trebuie sa fie uniforma pentru ca deviatile α_0 si α_x sa fie proportionale cu curentii (I_0 si I_x) din aparat, relatia (12.4) devenind:

$$R_x = R_0 \frac{\alpha_0}{\alpha_x}. \quad (12.5)$$

La utilizarea schemei din figura 12.4,c este necesar ca tensiunea de alimentare U sa ramâna constanta în timpul determinarilor si $R_g \ll R_x // R_0$, mai bine spus $R_g \ll \min\{R_x, R_0\}$.

Pe baza celor de mai sus s-au construit miliohmmetre, megohmmetre si teraohmmetre.

12.2.1. Miliohmmetre

Schema de baza a miliohmmetrelor este prezentata în figura 12.5,a. Voltmetrul V , cu rezistenta de intrare suficient de mare, masoara tensiunea la bornele rezistorului R_x , iar curentul constant prin rezistorul R_x este generat de o sursa cu rezistenta interna, R_i , mare. Masurarea se face obligatoriu în conexiune cuadripolara. Uneori masurarea este executata în curent alternativ.

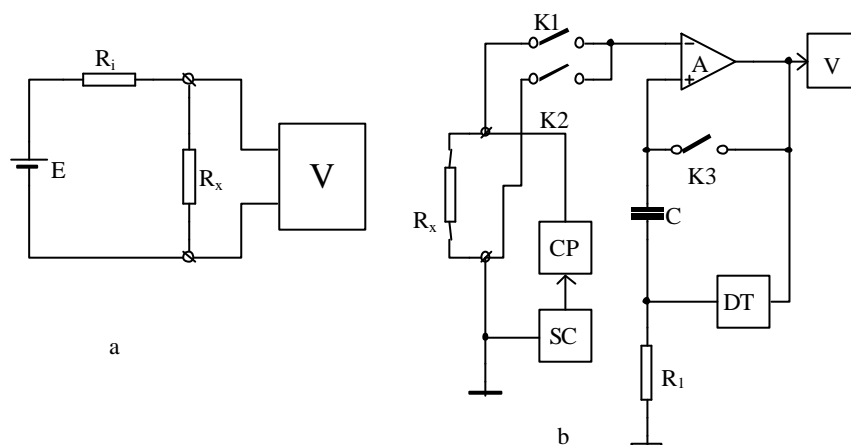


Fig. 12.5

În figura 12.5,a, generatorul de curent constant (E) si voltmetrul (V) nu au nici un punct comun (din cauza rezistentei conexiunilor), de unde necesitatea de izolare a unuia dintre ele fata de masa. O solutie care elimina aceasta necesitate este prezentata în figura 12.5,b, unde: V este un voltmetru digital, SC – sursa de curent constant, CP – circuit de protectie, DT – divizor de tensiune si C – un condensator cu rol de memorie. Cu putin timp înainte de masurare, întreruptoarele K_2 si K_3 se închid, iar K_1 se deschide; în acest fel, se aplica amplificatorului operational A caderea de tensiune pe conexiunea dinspre masa si rezistorului R_x . Pentru masurare, K_1 se închide, iar K_2 si K_3 de deschid (pozitia din figura); tensiunea reziduala “memorata” de condensatorul de decalaj C se scade din tensiunea aplicata, masurându-se doar caderea de tensiune utila pe R_x .

12.2.2. Megohmmetre si teraohmmetre

La masurarea rezistentelor mari si foarte mari se impun câteva cerinte importante:

– masurarea trebuie facuta la o tensiune ridicata (eventual la mai multe valori), deoarece valoarea rezistentei R_x depinde, în multe cazuri, de tensiunea aplicata. În plus, este util ca aparatul sa permita masurarea la mai multe valori ale tensiunii;

– posibilitatea masurarii atât în conexiune tripolara (borne izolate de masa), cât si în conexiune dipolara (o borna la masa). Primul caz este necesar pentru ca rezistentele parazite între borne si masa sa aiba influenta neglijabila asupra rezultatului masurarii.

Megohmmetrele se realizeaza cu ajutorul unui voltmetru cu rezistenta interna foarte mare care masoara tensiunea la bornele unei rezistente etalon (R_e) conectata în serie cu rezistenta necunoscuta R_x (fig. 12.6a).

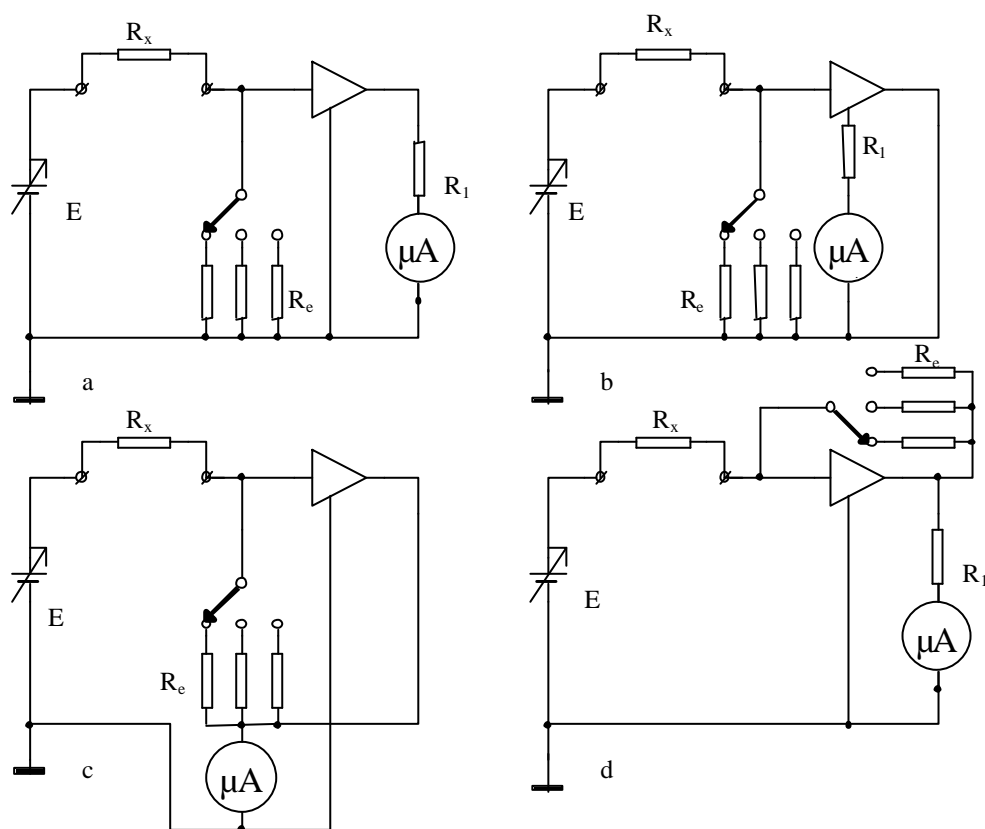


Fig. 12.6

Se impune o tensiune stabila si suficient de înalta aplicata obiectului de masurat si rezistenta de izolatie mare a punctelor critice din circuit. De regula $R_e \ll R_x$. De cele mai multe ori se foloseste un voltmetru cu tranzistoare cu efect de câmp.

Tensiunea de alimentare E , de obicei între 10 V si 1000 V, se obtine prin intermediul unui stabilizator de tip serie (v. cap. 1). Rezistenta de izolatie trebuie sa fie mare în comparatie cu R_e .

În figura 12.6 (*b*, *c* si *d*) sunt reprezentate câteva variante ale schemei de baza din figura 12.6,*a*. Schema din figura 12.6,*b* prezinta o varianta de amplificator cu reactie negativa puternica, pentru marirea rezistentei de intrare si cresterea stabilitatii. În schemele din figurile 12.6, *c* si *d* principiul este putin modificat: rezistoarele de referinta, R_e , sunt folosite pentru reactia negativa a amplificatorului.

Scara aparatelor realizate dupa schemele din figurile 12.6 este puternic neliniara, ceea ce este un dezavantaj al metodei. În schimb, ea permite construirea de aparate simple, cu posibilitati de masurare pâna la curenti prin R_x de ordinul $10^{-11} \dots 10^{-12}$ A (de exemplu, 10^{14} la 10^{15} ? masurat la 1000 V) în cazul amplificatoarelor cu tranzistor cu efect de câmp. Gamele de masurare se schimba prin comutarea rezistoarelor R_e si a tensiunilor de alimentare. Pentru ca rezultatul masurarii sa nu depinda de tensiune, odata cu schimbarea tensiunii se modifica în mod corespunzator si sensibilitatea instrumentului indicator.

Unele teraohmmetre utilizeaza scheme mai perfectionate fata de cele din figura 12.6. O solutie pentru eliminarea neliniaritatii scarii hiperbolice este cea din figura 12.7. Curentul prin rezistenta de masurat R_x se aplica unui amplificator logaritmnic AL_1 , iar un curent de referinta se aplica unui al doilea amplificator logaritmnic AL_2 . Diferenta tensiunilor de iesire ale celor doua amplificatoare este:

$$U_2 - U_1 = \left(K_1 \lg \frac{U}{R_e} - K_2 \lg \frac{U}{R_x} \right) = K \lg \frac{R_x}{R_e}. \quad (12.6)$$

Se obtine astfel o scara logaritmica, foarte convenabila, gradata de la 0,1 la 10 (doua decade). În plus, masurarea este independenta de tensiunea U aplicata lui R_x .

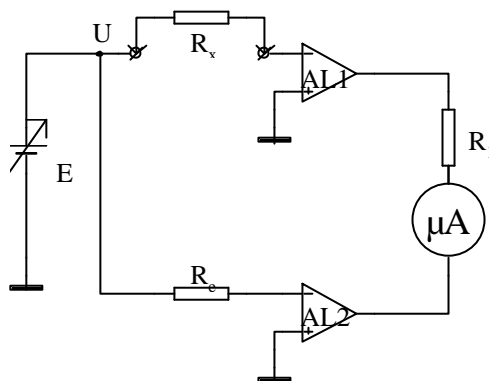


Fig. 12.7

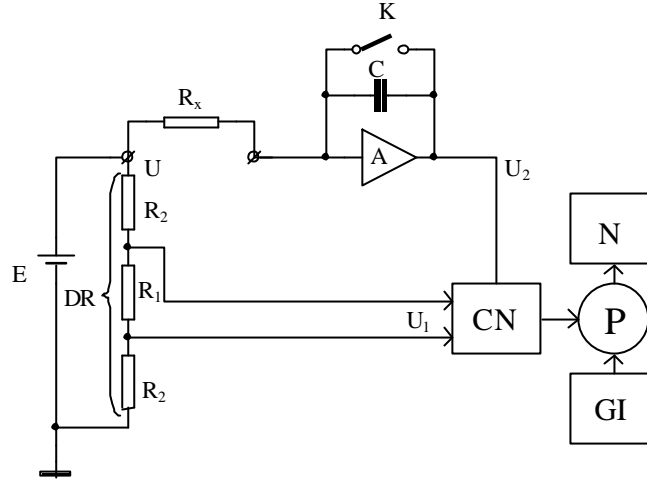


Fig. 12.8

O soluție cu totul diferită este cea prezentată în figura 12.8. Integratorul A produce o tensiune de ieșire a cărei pantă de variație în timp este proporțională cu $1/R_x$. Un divizor rezistiv DR comanda deschiderea și închiderea porții P, astfel încât numărarea impulsurilor de frecvență f (produse de generatorul GI) se face între două nivele U_1 și U_2 ale tensiunii integratorului, fixate cu ajutorul

comparatorului de nivel CN. Deoarece: $U_2 = -\frac{1}{CR_x} \int_{t_1}^{t_2} U dt = \frac{-U}{CR_x} (t_2 - t_1) = \frac{-\Delta t}{CR_x} U$

rezulta ca $R_x = \frac{\Delta t}{C} \cdot \frac{U}{-U_2}$ și dacă prin CN fixăm $-U_2 = U_1 - U_2$, rezulta:

$$R_x = \frac{\Delta t}{C} \frac{U}{U_1 - U_2}, \quad (12.7)$$

sau, introducând raportul celor două rezistențe ale divizorului $\left(\frac{U}{U_1 - U_2} = \frac{R_1}{R_2} \right)$ și

faptul ca $\Delta t = N \cdot T = N / f$, se deduce:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{f C} \cdot N, \quad (12.8)$$

unde N este numărul de impulsuri înregistrate. Se obține astfel un teraohmmetru digital, de mare precizie (între 0,1% și 1%), cu posibilitate de măsurare până la $10^{16} \Omega$, la tensiuni între 1 V și 1000 V.

O problemă importantă legată de tehnica de măsurare este aceea a influenței câmpurilor electrice exterioare. Câmpurile electrice lent variabile (câmpurile

electrostatice) produc o instabilitate a indicatiei. Câmpurile electrice de 50 Hz pot falsifica masurarea, datorita neliniaritatii amplificatorului, sau îl pot bloca. De aceea, este necesar sa se ia masuri de ecranare corespunzatoare a obiectului de masurat.

La masurarea rezistentei de izolatie a capacitoarelor de capacitate mare, apar câteva probleme specifice. Pentru încărcarea suficient de rapida a capacitorului, sursa trebuie sa aiba rezistenta interna mica. De asemenea, trebuie asigurata descarcarea condensatorului dupa masurare pentru evitarea accidentelor. Daca tensiunea are o componenta alternativa mare, aceasta da nastere unui curent alternativ prin amplificator, care poate împiedica masurarea normala.

12.3. MASURAREA REZISTENTEI ELECTRICE PRIN METODE DE PUNTE

Una din cele mai raspândite metode de laborator de masurare a rezistentelor este puntea de curent continuu, aceasta datorita faptului ca prin ea se pot masura rezistente cu valori de la 10^{-6} ? la 10^{10} ? cu precizii de la 1% la 2% în cazul puntilor simple, portabile, pâna la 0,001% în cazul unor punti de laborator speciale.

Puntile de curent continuu pot fi clasificate astfel:

- punti pentru masurarea rezistentelor de valori medii (puntea Wheatstone);
- punti pentru masurarea rezistentelor de valori mici (punti Thomson);
- punti pentru masurarea rezistentelor de valori mari (variante ale puntii Wheatstone).

12.3.1. Punti Wheatstone echilibrate

Puntea Wheatstone se compune din patru brate rezistive, o diagonala de alimentare în care se conecteaza sursa si o diagonala detectoare în care se conecteaza aparatul de masurat (fig. 12.9,a). Variind rezistentele puntii, se poate obtine ca prin aparatul indicator curentul sa fie zero, adica puntea sa fie “echilibrata”, ceea ce înseamna ca tensiunile la bornele rezistentelor R_1 si R_2 , respectiv R_4 si R_3 sunt egale doua câte doua: $R_1 I_1 = R_2 I_2$ si $R_4 I_1 = R_3 I_2$ (v. “Bazele electrotehnicii”), de unde rezulta:

$$R_4 = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 . \quad (12.9)$$

Relatia (12.9) constituie conditia de echilibru a puntii Wheatstone si permite determinarea uneia dintre rezistente, de exemplu $R_4 \equiv R_x$, când sunt cunoscute celelalte trei. Aceasta relatie este independenta de tensiunea electromotoare E si de rezistenta interna a sursei R_i , de sensibilitatea si de rezistenta interna a indicatorului de nul (R_{IN}).

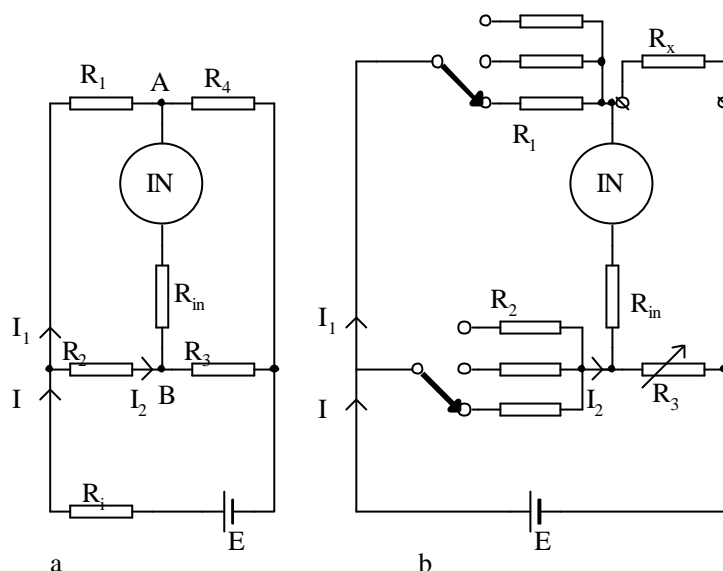


Fig. 12.9

Sensibilitatea punții este afectată de toți factorii menționați. Există multe moduri de a exprima sensibilitatea punții Wheatstone și a căuta maximum ei, în funcție de marimile considerate ca limitative: tensiuni, curenți, puteri. O expresie generală a tensiunii de dezechilibru, în apropierea echilibrului este următoarea (v. cursul “Bazele electrotehnicii”):

$$\frac{\Delta U_{AB}}{E} = \frac{\frac{\Delta R_4}{R_4}}{2 + \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_i}{R_{IN}} \left(2 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{\sum R}{R_{IN}} + R_i \sum \frac{1}{R}}, \quad (12.10)$$

unde: ΔU_{AB} este tensiunea de dezechilibru la bornele indicatorului de nul;
 E – tensiunea de alimentare a punții; ΔR_4 – abaterea rezistenței R_4 de la valoarea de echilibru; R_i – rezistența internă a sursei; R_{IN} – rezistența internă a indicatorului de nul; $\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ și $\sum \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$.

Dacă $R_i \rightarrow 0$ și $R_{IN} \rightarrow \infty$, ceea ce corespunde destul de bine situației în cazul punților cu indicator electronic, sensibilitatea este maximă dacă brațele punții sunt egale: $R_1 = R_3$. În acest caz $\Delta U_{AB}/E = 0,25 \Delta R_4/R_4$, adică raportul dintre variația tensiunii de ieșire a punții și tensiunea de alimentare este $1/4$ din variația relativă a rezistenței de măsurat. În toate celelalte cazuri valoarea acestui raport este mai mică.

Daca $R_i = 0$, dar $R_{IN} \rightarrow \infty$, se obtine sensibilitate maxima (putere maxima în indicatorul de nul) daca $R_{IN} = R_1 = R_3$ (conditie de adaptare). Daca puntea are brate inegale ($R_1 \neq R_3$), atunci pentru sensibilitatea maxima R_{IN} trebuie sa fie egal cu rezistenta echivalenta a puntii între punctele de conectare a indicatorului de nul:

$$\frac{1}{R_{IN}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}. \quad (12.11)$$

Schema practica a majoritatii puntilor Wheatstone utilizate în prezent este cea din figura 12.9b. Conditia de echilibru este:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3, \quad (12.12)$$

R_1 si R_2 fiind cunoscute sub denumirea de *rezistente de raport* si sunt rezistente variabile în decade (1+10+100+1000) care permit fixarea unui raport egal cu 10^{-3} la 10^3 . Rezistenta R_3 , zisa *de comparatie*, este tot variabila în decade, cu valori cuprinse între 10^{-1} si 10^5 ? .

Practic, echilibrul puntii Wheatstone se obtine fixând un raport constant între rezistentele R_1 si R_2 si variind rezistenta de comparatie R_3 , fie invers.

Domeniul de masurare este limitat inferior la 1 Ω , pentru ca sub aceasta valoare erorile de masurare cresc foarte mult datorita influentei rezistentelor conductoarelor de legatura si a rezistentelor de contact de la bornele de legare la punte a rezistorului de masurat. La valori ale rezistentei de masurare mai mari decât 1 M Ω eroarea creste peste limita admisa, pentru ca scade sensibilitatea din cauza reducerii curenților I_1 si I_2 din laturile puntii.

12.3.2. Puncti pentru masurarea rezistentelor electrice mici

În cazul masurării rezistentelor cu valori mici (1 Ω la $10^{-6} \Omega$), rezistentele de contact si cele ale conexiunilor fiind de acelasi ordin de marime ca si rezistenta de masurat, introduc erori importante la masurarea rezistentei cu puntea Wheatstone.

Rezistentele conexiunilor pot fi îndepărtate aproape complet conectând rezistenta de masurat la bornele sursei si indicatorului de nul, în schimb pentru a elimina influenta *rezistentelor de contact* trebuie separata functia de “alimentare” de cea de “masurare”, disociind bornele respective. Se ajunge astfel la rezistenta cu patru borne (v. cap. 1), reprezentata în figurile 12.10, *a* si *b*. Curentul dintre “bornele de curent” (AB) produce între “bornele de tensiune” (MM') o cadere de tensiune ce poate fi utilizata într-un circuit de masurat. Prizele de tensiuni sunt construite din doua cutite paralele (fig. 12.10b), care lasa în afara bornele de curent (AB). Potentialul cules la bornele (MM') reprezinta strict caderea de tensiune de la bornele rezistentei de masurat si nu înglobeaza si caderile de tensiune pe

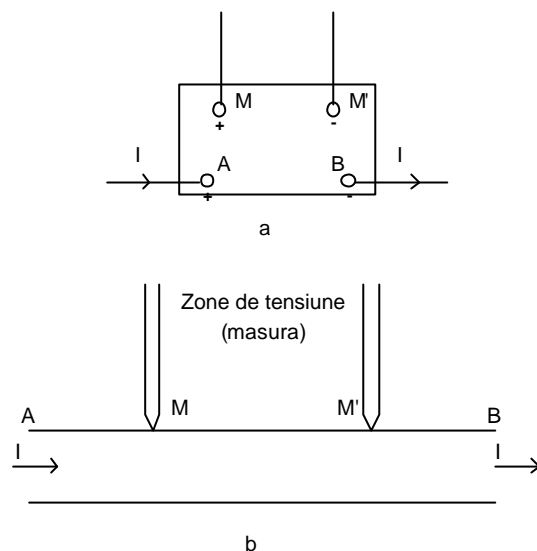


Fig. 12.10

Pentru echilibrarea punții se fixează $R_1/R_2 = R_3/R_4$, ceea ce presupune un cuplaj mecanic între R_1 cu R_3 și R_2 cu R_4 și este variată fie rezistența etalon R_e , fie rezistențele R_1 și R_3 simultan.

Expresia rezistenței de măsurat este asemanătoare cu cea obținută în cazul punții Wheatstone:

$$R_x = R_e \frac{R_1}{R_2}. \quad (12.13)$$

Forma practică a punții Thomson este reprezentată în figura 12.13.

Rezistoarele $R_1 = R_3$ sunt variabile în decade (cutii de rezistență), iar $R_2 = R_4$ sunt comutabile, cu valori de forma 10^n . Folosind pentru R_e tot valori multiplu de 10, valoarea citită pe indicatoarele lui R_1 se multiplică simplu cu un factor multiplu de 10 pentru a obține rezultatul măsurării.

Puntea Thomson are și avantajul că prin R_x și R_e poate avea loc un curent relativ mare, pentru a se obține o sensibilitate ridicată. În același scop, indicatorul de nul trebuie să aibă o sensibilitate în tensiune cât mai mare (rezistență internă mică).

Eroarea de măsurare a rezistențelor cu puntea dublă Thomson poate fi mai mică decât 0,1%.

Cu puntea dublă se măsoară rezistențe mici ca: rezistențe de contact, rezistențe de aparate (ampermetre, circuite de curent de wattmetre etc.), rezistențe de surturi, siguranțe fuzibile și rezistivitățile conductoarelor (prin măsurarea rezistenței R a unei anumite lungimi l [m] din acel conductor pentru care se cunoaște aria secțiunii S (mm²): $\rho = RS/l$ [Ω mm²/m]).

rezistențele de contact (AB) ale curentului de alimentare. Prin acest procedeu se pot realiza rezistențe definite cu o eroare de o milionime.

Conectând o astfel de rezistență într-o punte de tip Wheatstone, pentru a o măsura, și comparând-o cu o rezistență de același tip, pentru a lucra la sensibilitatea maximă, se obține puntea din figura 12.11 care, redesenată ca în figura 12.12 capătă forma clasică a punții duble Thomson (Kelvin).

Specific acestei punți este conductorul de legătură dintre rezistoarele R_x și R_e a cărui rezistență r trebuie să fie cât mai mică ($r \ll R_e$).

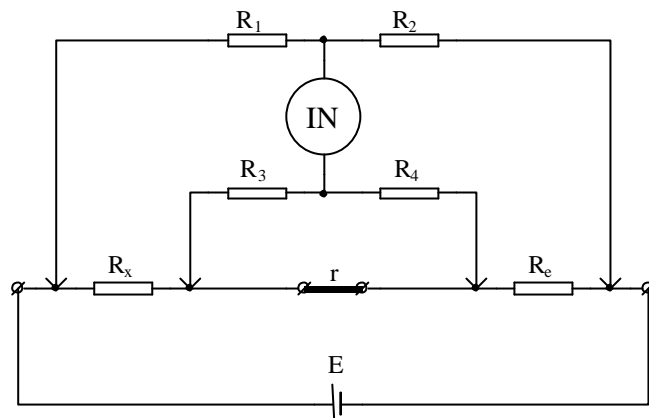


Fig. 12.11

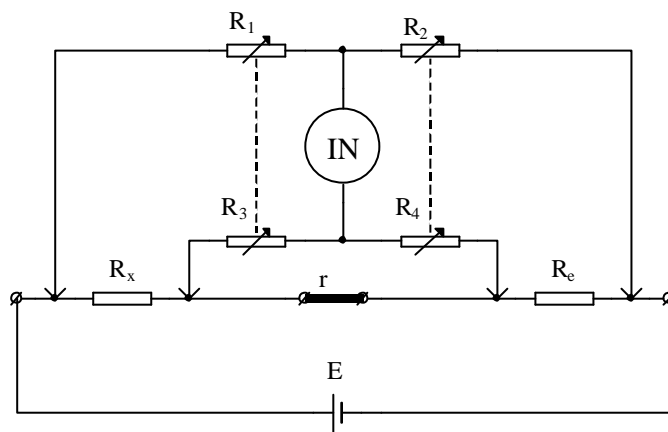


Fig. 12.12

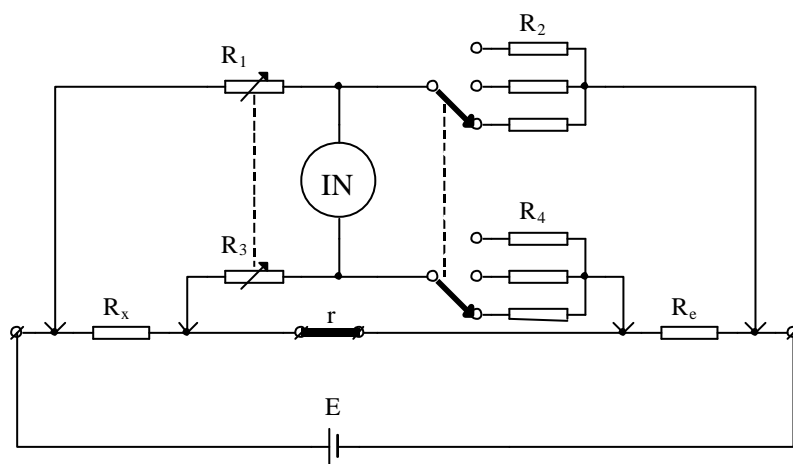


Fig. 12.13

12.3.3. Puntii pentru masurarea rezistentelor electrice mari

La masurarea rezistentelor electrice de valori mari (peste $10\text{ M}\Omega$) cu ajutorul puntii Wheatstone s-au constatat urmatoarele dificultati: necesitatea unor indicatoare de nul de rezistenta mare (tip "electrometru"); cresterea excesiva a valorilor rezistentelor din bratele puntii; influenta marita a rezistentelor de izolatatie.

Ca indicatoare de nul se pot folosi amplificatoare de curent continuu cu tranzistoare cu efect de câmp, care asigura o sensibilitate suficienta. Pentru masurarea rezistentelor de valori peste $10^9 \div 10^{10} \Omega$ se utilizeaza electrometrele speciale, cele mai raspândite fiind cu tranzistoare cu efect de câmp speciale, cu modulator cu diode varicap sau cu condensator vibrant (v. cap. 2).

În ceea ce priveste valorile rezistentelor din bratele puntii exista doua posibilitati:

a) alegerea unor rezistente de valori comparabile cu R_x . Astfel, se mentine o sensibilitate ridicata a puntii, dar îngreuneaza obtinerea unei precizii bune, datorita instabilitatii rezistoarelor de valori mari;

b) alegerea de rezistente de valori nu prea mari, dar puternic inegale. Aceasta asigura o stabilitate buna, dar conduce la scaderea sensibilitatii.

În figura 12.14 este prezentata o schema de punte ce utilizeaza rezistente de valori acceptabile.

Daca se transfigureaza triunghiul din figura 12.14,a, format din R_e, R_1, R_3 , în stea (asa ca în figura 12.14,b, în care $R_2 = R_e + R_1 + R_3$), puntea devine o punte simpla la care relatia de echilibru este:

$$R' \cdot \left(R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_e + R_1 + R_3} \right) = R_x \cdot \frac{R_e \cdot R_3}{R_e + R_1 + R_3}, \quad (12.14)$$

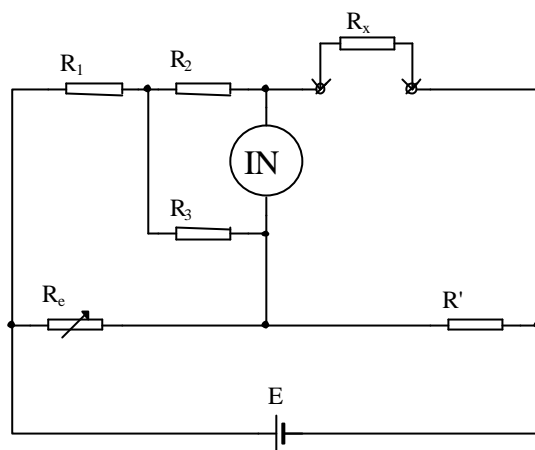
din care rezulta:

$$R_x = R' \frac{R_2(R_e + R_1 + R_3) + R_1 \cdot R_3}{R_e R_3}. \quad (12.15)$$

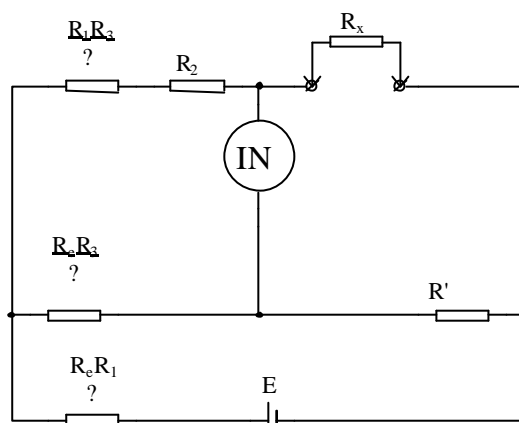
Rezistenta variabila R_e este plasata în bratul opus lui R_x , adica prin scaderea lui R_e catre zero se ajunge la $R_x \rightarrow \infty$.

La masurarea rezistentelor mari (peste $10^9 \Omega$) trebuie sa se tina cont de urmatoarele:

- valoarea rezistentelor depinde de tensiune, de aceea masurarea trebuie sa se faca la tensiuni specificate (uneori ajungând la 500-1000 V);
- datorita curentilor de polarizare echilibrul puntii devine stabil dupa un timp de la aplicarea tensiunii (poate ajunge la ordinul minutelor);
- este necesara repetarea masurarii cu polaritatea inversata, pentru eliminarea erorilor datorate unor efecte de neliniaritate sau decalaje de tensiune.



a



b

Fig. 12.14

12.3.4. Punti neechilibrate

Atât punctile Wheatstone cât și punctile Thomson pot fi utilizate și în regim de punte neechilibrată, în scopul măsurării unor variații mici ΔR_x ale rezistenței R_{x0} față de o valoare de echilibru R_{x0} . În general, punctile neechilibrate se utilizează la măsurarea electrică a unei mărimi neelectrice. Traductorul rezistiv, de valoare nominală R_{x0} , este conectat pe latura a 4-a a punții, în celelalte brațe ale punții existând rezistențe de precizie, unele dintre ele fiind reglabile. Inițial, puntea este adusă la echilibru pentru valoarea nominală a rezistenței traductorului rezistiv R_{x0} . Schema de principiu a unei punți care lucrează în regim neechilibrat este aratăată în figura 12.15.

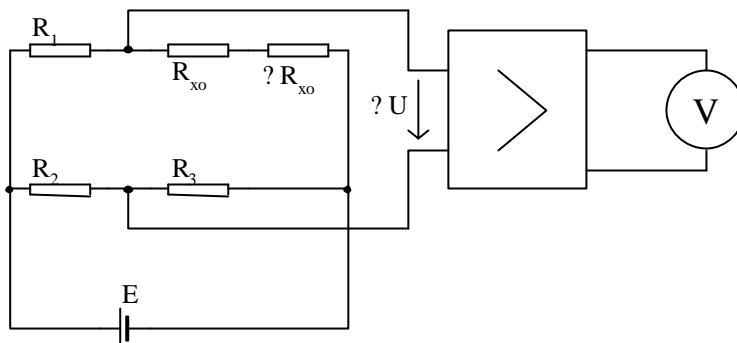


Fig. 12.15

Datorita varietii marimii neelectrice de intrare, marimea de iesire a traductorului variaza cu $\pm \Delta R_{x0}$ fata de valoarea initiala, puntea se dezechilibreaza, la iesirea ei rezultând o tensiune de dezechilibru $\pm \Delta U$. Aceasta tensiune este masurata (dupa o prealabila amplificarea) cu un aparat indicator de zero etalonat direct în unitati ale marimii neelectrice de studiat. Pentru o functionare corecta, tensiunea de alimentare E a puntii trebuie sa fie constanta în timp.

Pentru liniarizarea puntii si marirea sensibilitatii se pot adopta solutii de punti neechilibrate cu rezistente variabile într-o latura, în doua sau patru laturi.

Un exemplu de punte de limita utilizata pentru încadrarea rezistentei R_x între doua repere limita este prezentata în figura 12.16.

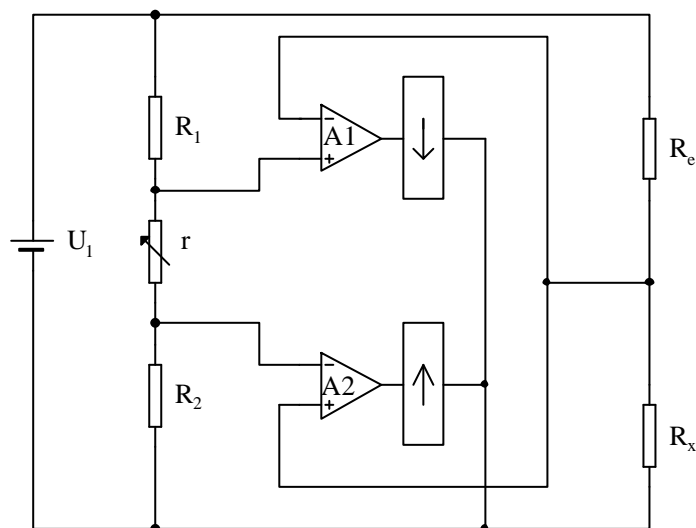


Fig. 12.16

Puntea consta din bratele $R_1 = R_2$ si o rezistenta r reglabila între ele, R_e – rezistenta etalon si rezistenta R_x de masurat. Daca se admite toleranta $\pm a\%$ pentru R_x fata de R_e , se regleaza r astfel încât:

$$r = \frac{a}{100}(R_1 + R_2). \quad (12.16)$$

Amplificatoarele operationale A_1 si A_2 , având functie de comparatoare, comanda relele polarizate RL_1 si respectiv RL_2 . Daca valoarea lui R_x se afla între limitele stabilite, ambele amplificatoare sunt blocate si relele nu sunt actionate. Daca R_x depaseste una din limite, amplificatorul corespunzator produce un curent la iesire si actioneaza releul respectiv. RL_1 si RL_2 pot fi adesea si niste indicatoare luminoase (cu “LED”-uri).

12.4. MASURAREA REZISTENTEI ELECTRICE PRIN METODE INDIRECTE

Sunt numeroase astfel de metode, dintre care vor fi prezentate numai câteva, mai des utilizate.

12.4.1. Metoda ampermetrului si voltmetrului

Este o metoda arhicunoscuta (a mai fost comentata în capitoul 1), care se bazeaza pe legea conductiei electrice (Ohm). Rezistorul de valoare necunoscuta este conectat la o sursa de curent continuu. În serie cu el este legat un ampermetru, iar în paralel cu acest rezistor este legat un voltmetru. Valoarea rezistentei se calculeaza cu relatia lui Ohm: $R = U / I$.

Aceasta metoda, aparent simpla, are doua variante de schema în functie de felul cum se conecteaza voltmetrul fata de ampermetru (fig. 12.17): asa-zisul montaj amonte (cu comutatorul K pe pozitia 1) si montajul aval (cu comutatorul K plasat pe pozitia 2).

În *montajul amonte* (K pe 1) voltmetrul masoara si caderea de tensiune pe ampermetru ($U = r_A I + R_x I$), valoarea reala a rezistentei R_x fiind:

$$R_x = \frac{U - r_A I}{I} \quad (12.17)$$

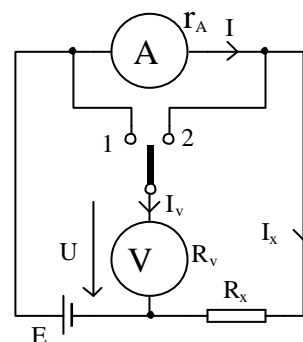


Fig. 12.17

eroarea relativa de metoda fiind:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{r_A}{R_x} \quad (12.18)$$

si este cu atît mai mica cu cît rezistenta ampermetrului r_A este mai mica si rezistenta de masurat R_x este mai mare.

În cazul *montajului aval* (K? 2) curentul indicat de ampermetru este $I = I_x + I_V = U / R_V + U / R_x$, astfel ca rezistenta de masurat se calculeaza cu:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} \quad (12.19)$$

Eroarea relativa de metoda este:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + R_V} = -\frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_x}} \quad (12.20)$$

si este cu atît mai mica cu cît rezistenta proprie a voltmetrului R_V este mai mare si cu cît rezistenta de masurat R_x este mai mica.

Atunci cînd nu cunoastem rezistentele proprii ale voltmetrului si ampermetrului, pentru a obtine valoarea rezistentei de masurat cît mai apropiata de valoarea reala, rezistentele mici se vor masura cu montajul aval, iar cele mari cu montajul amonte, în ambele cazuri fiind utilizata relatia $R = U / I$.

12.4.2. Metoda substitutiei

Consta în compararea între ele a doua rezistente: rezistenta de masurat R_x si cea etalon R_e , substituindu-se una pe alta în circuitul de masurat (fig. 12.18). Se introduce

întîi rezistenta de masurat în circuit, apoi cea etalon, manevra facîndu-se cu ajutorul comutatorului voltmetric K_1 . Se masoara curentul I cu rezistenta R_x în circuit si apoi la introducerea rezistentei R_e se urmareste obtinerea aceluiasi curent reglînd rezistenta etalon R_e . În acest caz rezulta $R_x = R_e$.

Aceasta metoda este precisa, ea ne-depinzînd de clasa de precizie a aparatului indicator utilizat, ci numai de precizia rezistentei etalon R_e si de cît de constanta este t. e. m. E a sursei de alimentare (în timpul efectuării comparatiei).

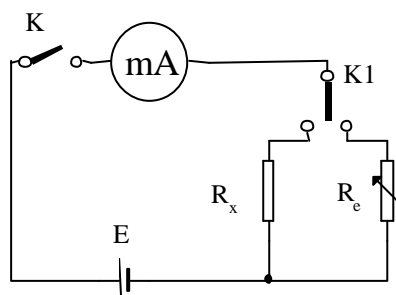


Fig. 12.18

12.5. MASURAREA IMPEDANTELOR PRIN METODE DIRECTE

Impedantele $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ si impedantele complexe $\underline{Z} = R + jX$ au partea reala data de rezistenta electrica (R) a elementului considerat si partea imaginara egala cu reactanta (X) a elementului, produsa de condensatoarele si bobinele elementului analizat.

În ceea ce le priveste, *condensatoarele* folosite în circuitele electronice de joasa si înalta frecventa au valori de la ordinul câtorva picofarazi pâna la ordinul câtorva zeci de microfarazi.

La frecvente joase, condensatoarele utilizate sunt în general fixe si construite cu izolatie de mica sau hârtie. Ele pot fi considerate ca având un factor de pierderi practic neglijabil.

La frecvente înalte sunt utilizate condensatoare variabile cu aer de valori de la ordinul picofarazilor pâna la un nanofarad.

Condensatoarele cu aer au un factor de pierderi neglijabil si caracteristici independente de frecventa.

Tot la frecvente înalte sunt folosite si condensatoarele fixe sau ajustabile, cu dielectric solid (mica sau placi izolante), cu valori de la câtiva picofarazi, pâna la câtiva nanofarazi.

Condensatoarele etalon sunt, pentru frecvente joase, condensatoare cu mica, asezate în cutii cu decade reglabile de la 0,001 μF pâna la 1,1 μF , iar pentru frecvente înalte, condensatoarele cu aer.

Bobinele folosite în circuitele electronice de joasa si înalta frecventa au inductivitati cu valori de ordinul zecimilor de microhenry pâna la ordinul henry-lor.

În gama frecventelor joase, inductantele bobinelor au valori de ordinul milihenry-lor pâna la ordinul henry-lor, fiind construite cu aer sau cu miez magnetic fix sau reglabil. Miezul este construit, de obicei, din tole subtiri pentru frecventele cele mai joase si din pulbere de fier aglomerata pentru frecventele mai ridicate. Ele lucreaza la frecvente sub frecventa proprie de rezonanta.

În gama frecventelor înalte (peste 20 000 Hz), inductivitatile bobinelor au valori de la zecimi de microhenry pâna la sute de milihenry. Aceste bobine de inductanta sunt, de obicei, fara miez feromagnetic, bobinate pe un suport izolant de dimensiuni mici; se construiesc totusi, pentru frecventele de la limita inferioara a acestei game, si bobine cu miez din pulberi aglomerate.

Bobinele utilizate la frecvente înalte lucreaza de asemenea la frecvente sub frecventa proprie de rezonanta.

Inductivitatile bobinelor cu aer, utilizate la frecvente joase, pot fi considerate practic constante. Inductanta bobinelor cu miez feromagnetic depinde însa de frecventa.

Rezistenta inductivitailor creste cu frecventa si, deci, factorul de calitate

$\left(Q = \frac{\omega L}{R} \right)$ al bobinei scade.

12.5.1. Capacimetre

În figura 12.19 este redată schema de principiu a unui convertor capacitate-tensiune utilizat în cadrul unui multimetru digital, pentru măsurarea directă a capacităților electrice.

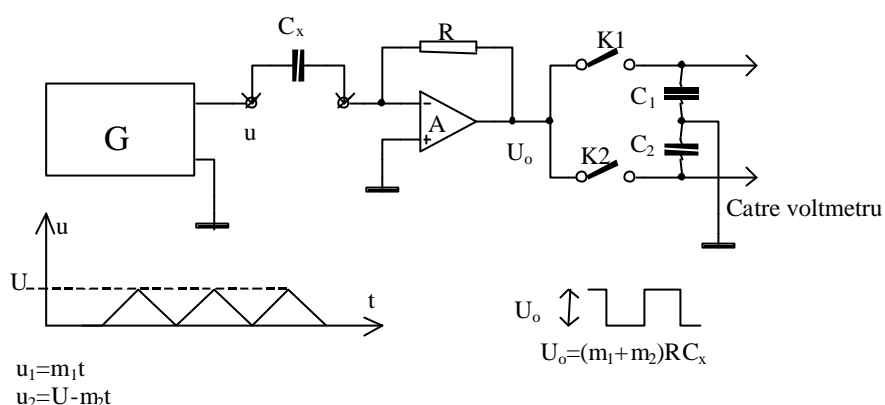


Fig. 12.19

Generatorul G de frecvență joasă (50-120 Hz) furnizează o tensiune în formă de dinți de fierăstrău, aplicată prin condensatorul de măsurat C_x la borna inversoare a unui amplificator operațional în montaj derivator. La ieșirea aparatului apare o tensiune dreptunghiulară, de amplitudine proporțională cu C_x și cu suma pantelor de creștere m_1 și descreștere m_2 a tensiunii în dinți de fierăstrău:

$$u_0 = U_0 = (m_1 + m_2)R \cdot C_x = K \cdot C_x \quad (12.21)$$

Această tensiune este memorată de condensatoarele C_1 și C_2 prin intermediul întreruptoarelor K_1 și K_2 (realizate prin porți cu tranzistoare cu efect de câmp) comandate sincron de semnalul dat de generator.

Metoda are numeroase avantaje: nu depinde de caracteristicile semnalului dat de generator (care trebuie să păstreze numai pantele constante); independența față de deriva amplificatorului operațional; permite măsurarea în conexiune dipolara sau tripolara. Măsurarea este posibilă în domeniul $0,01 \text{ pF} \div 200 \text{ }\mu\text{F}$, cu precizie de la 0,1 la 1%.

12.5.2. Inductantmetre

Funcționează pe principiul măsurării tensiunii la bornele inductorului de măsurat. Curentul prin bobina este dat de un generator G printr-o rezistență R de valoare mare, $R \gg \omega L$, care să permită obținerea unui curent constant (fig. 12.20)

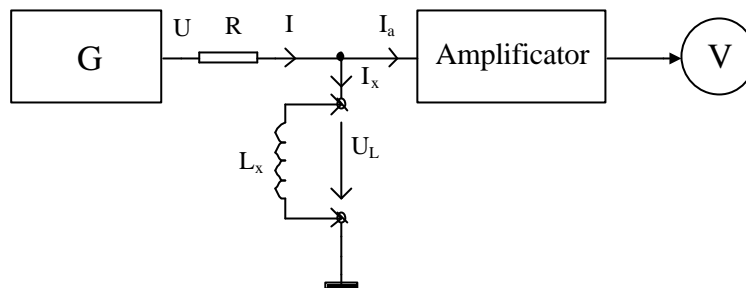


Fig. 12.20

Dacă I_a este foarte mic ($I_a \ll I$), atunci $I_x = I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L_x)^2}}$ și dacă $R \gg \omega L_x$, atunci $I \approx U / R = I_x$. Rezultă deci:

$$U_L = L_x \cdot \omega \cdot I_x = L_x \cdot \omega \cdot \frac{U}{R} = K \cdot L_x \quad (12.22)$$

și prin urmare tensiunea măsurată de voltmetru, la ieșirea din amplificator, este proporțională cu inductivitatea L_x .

Inductanțmetrele se realizează rar ca aparate independente, fiind combinate cu capacimetre (LC-metre).

Scara aparatului este liniară, domeniile schimbându-se prin modificarea frecvenței și a rezistenței R , în gama 10 μH la 100 H, iar precizia este 0,5 la 3%.

12.5.3. Impedantmetre

Sunt aparate ce măsoară impedanța în modul și fază. Schema bloc a impedantmetrului vectorial este prezentată în figura 12.21.

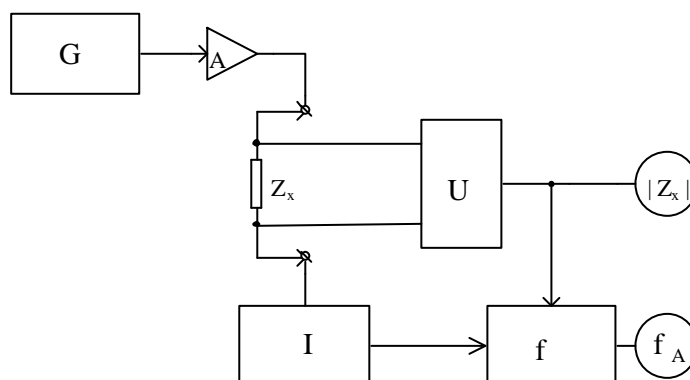


Fig. 12.21

În aceasta schema: U , I și f sunt blocuri ce sesizează respectiv tensiunea la bornele impedanței, curentul din impedanță și defazajul dintre ele.

Pentru $|Z_x| \leq 1000 \Omega$ amplificatorul A este comandat de blocul I ce reglează automat amplificarea prin A , astfel încât curentul rămâne constant, independent de valoarea lui Z_x . Blocul U preia tensiunea la bornele lui Z_x și o aplică indicatorului $|Z_x|$, gradat în ohmi. Semnalele de la U și I sunt limitate și aplicate fazmetrului f , de tip cu trecere prin zero (detector de fază).

Pentru $|Z_x| > 1000 \Omega$ sistemul funcționează similar, dar cu menținerea constantă a tensiunii.

Aparatul nu necesită reglaje complicate, indică direct Z_x și f_x într-o gamă largă de valori (Z_x de la $1 \div 10 \text{ M}\Omega$ și f : 0° la $\pm 90^\circ$), dar are precizie redusă (2% pentru Z și 6% pentru f). Unele aparate lucrează în domeniul de frecvențe 5 Hz la 500 kHz.

Pentru măsurarea modulului impedanței se poate utiliza impedanțmetrul în modul a cărui schemă bloc este prezentată în figura 12.22.

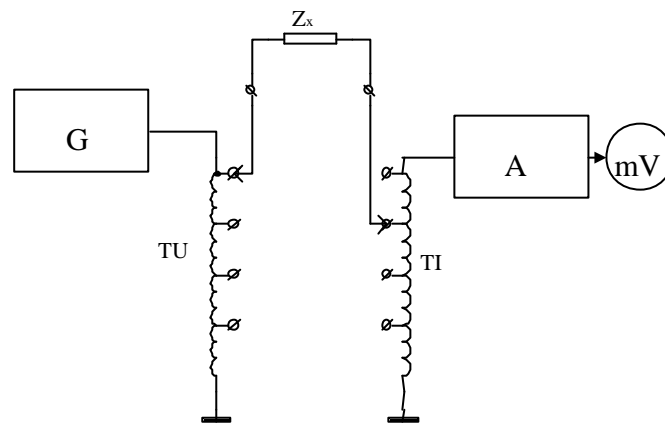


Fig. 12.22

Transformatoarele de tensiune (TU) și de curent (TI) cu prize s-au utilizat pentru lărgirea intervalului de măsurare a impedanței (de la ordinul ohmilor la acela al megohmilor). Tensiunea generatorului G și amplificarea etajului A , ce alimentează milivoltmetrul, trebuie să fie stabile.

O altă variantă este aceea de a măsura prin comparație, din figura 12.23.

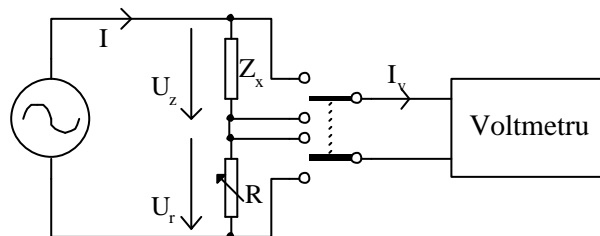


Fig. 12.23

Raportul U_Z/U_R este egal cu $|Z_x|/R$, dacă I_V este neglijabil în raport cu I , $U_Z = Z_x \cdot I$ și $U_R = R \cdot I$. Se poate lucra fie cu R de valoare constantă, citind valoarea lui U_Z la U_R constant, fie cu R variabil, reglând astfel pe R încât $U_Z = U_R$, obținându-se $|Z_x| = R$.

12.6. MASURAREA IMPEDANTEI PRIN METODE DE PUNTE

Metodele de punte sunt larg răspândite în tehnica măsurărilor electrice și electronice datorită sensibilității ridicate, precum și posibilităților variate de măsurare pe care le oferă.

Puntele de curent alternativ servesc în principal la determinarea parametrilor de circuit R, L, C , dar există și punți care măsoară direct impedanța pe componente (R, X) sau în modul și fază $(|Z|, \varphi)$. De asemenea, se mai utilizează punțile de curent alternativ pentru măsurarea frecvențelor, a puterilor, a unor mărimi neelectrice prin intermediul diverselor transductoare etc. Puntea de curent alternativ se pretează ușor la automatizarea măsurărilor în cadrul unui sistem de reglaj automat al unui anumit proces (ea va fi analizată pe larg la un alt curs: "Aparate de măsurat și control").

Puntele de curent alternativ pentru măsurarea impedanțelor rezultă uneori din schema punții Wheatstone, prin înlocuirea rezistențelor din brațele punții cu impedanțe. Puntea se alimentează de la o sursă de curent alternativ, iar pentru echilibrare se folosește un detector (indicator) de nul de curent alternativ. Alteleori, sunt utilizate punți de curent alternativ specifice care nu au un analog în curent continuu.

Schema generală a punții de curent alternativ este prezentată în figura 12.24. Condiția de echilibru a punții este:

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_4 \quad (12.23)$$

Ecuatia (12.23), în complex, este echivalentă cu două ecuații scalare ce pot fi scrise sub forma:

$$\begin{cases} R_1 \cdot R_3 - X_1 \cdot X_3 = R_2 \cdot R_4 - X_2 \cdot X_4 \\ R_1 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_1 = R_2 \cdot X_4 + R_4 \cdot X_2 \end{cases}, \quad (12.24)$$

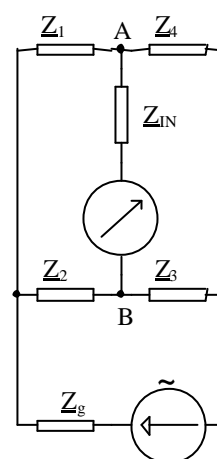


Fig. 12.24

sau sub forma:

$$\begin{cases} |Z_1 \cdot Z_3| = |Z_2 \cdot Z_4| \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases} \quad (12.25)$$

în care: $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$; $\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3$; $\underline{Z}_4 = R_4 + jX_4$ sau, pentru deducerea sistemului (12.25), sub forma $\underline{Z}_k = |Z_k| e^{j\varphi_k}$, $k = 1, 2, 3, 4$.

Observatii

1. Conditia de echilibru este data de un sistem de doua ecuatii ce trebuie satisfacuate simultan. Îndeplinirea acestei conditii se poate realiza prin reglarea a cel puțin doi parametri în schema puntii.

2. Scrierea impedantelor sub forma $\underline{Z} = R + jX$ presupune de obicei *schema serie* pentru impedante, însa acestea pot fi realizate si cu *schema paralel* a componentelor R, L, C . De aici posibilitatea realizarii unei diversitati foarte mari de puncti de curent alternativ. Totusi, nu toate aceste puncti pot fi echilibrate, iar altele permit cu greu atingerea echilibrului sau sunt neconvenabile ca realizare.

3. Conditia de faza ($\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$) limiteaza numarul punctilor ce pot fi echilibrate. De exemplu, puntea din figura 12.25,a este imposibil de echilibrat deoarece $\varphi_1 + \varphi_3 = -90^\circ$, iar $-90^\circ < \varphi_2 + \varphi_4 < 90^\circ$. Schimbând însa \underline{Z}_3 cu \underline{Z}_2 se obtine puntea din figura 12.25,b la care echilibrul este posibil.

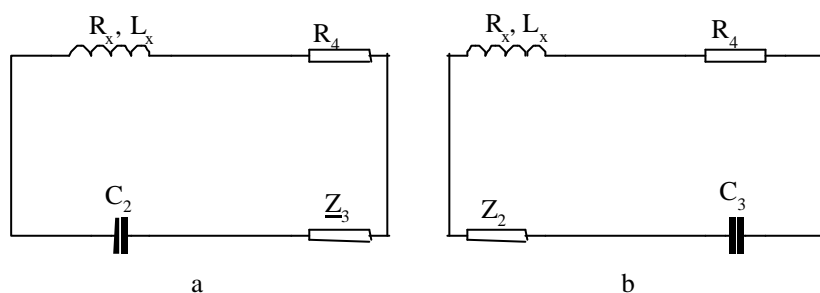


Fig. 12.25

4. Punctile cele mai convenabile sunt acelea la care cele doua marimi masurate pot fi citite separat. Acest lucru este posibil daca doua dintre impedantele puntii sunt fie rezistente pure, fie reactante pure (adica doua din unghiurile $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ sau φ_4 sa fie $0^\circ, +90^\circ$ sau -90°).

În general, impedanta de masurat este complexa ($\underline{Z}_x = R_x + jX_x$), ceea ce implica existenta în punte a unui alt brat de forma $\underline{Z} = R + jX$ (brat de referinta sau brat de comparatie), celelalte doua brate fiind de forma $\underline{Z} = R$ sau $\underline{Z} = jX$ (brate auxiliare).

Puntile în care bratele auxiliare sunt apropiate se numesc *punti de raport*, iar cele cu brate auxiliare opuse se numesc *punti de produs*.

Pentru *puntea de raport* la care \underline{Z}_3 este bratul de referinta, conditia de echilibru este:

$$\underline{Z}_x = \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \cdot \underline{Z}_3. \quad (12.26)$$

Astfel, impedanta \underline{Z}_x poate fi comparata cu impedanta \underline{Z}_3 . Daca raportul $\underline{Z}_1 / \underline{Z}_2$ este real, puntea compara doua impedante de acelasi fel (ambele inductive sau ambele capacitive).

Pentru *puntea de produs* la care \underline{Z}_2 este bratul de referinta conditia de echilibru se scrie:

$$\underline{Z}_x = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 \cdot \frac{1}{\underline{Z}_2} = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 \cdot \underline{Y}_2. \quad (12.27)$$

La aceste punti masurarea poate fi privita ca o comparare a impedantei \underline{Z}_x cu admitanta \underline{Y}_2 . Daca produsul $\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3$ este real puntea compara doua impedante de tipuri diferite (una inductiva cu una capacitiva).

5. Puntile care se pot echilibra sunt convergente. Puntile la care componentele masurate R_x si X_x se echilibreaza independent au convergenta maxima si sunt preferate în masurarile curenți. La aceste punti numarul reglajelor succesive este minim, depinzând de sensibilitatea indicatorului de nul.

6. În unele cazuri conditiile de echilibru (12.25) nu depind de frecventa tensiunii de alimentare a puntii. Acele scheme sunt preferate în masurari, evitându-se astfel constructiile unor surse de alimentare riguros sinusoidale.

Detalii în legatura cu puntile de curent alternativ pot fi gasite în lucrarea [8].