Lucrarea de laborator nr. 6

Măsurarea impedanţelor

rev 6

Scop: Măsurarea impedanţelor folosind diverse metode de măsură: metoda directă prin utilizarea unui LCR-metru și ohmetru, metoda indirectă: puntea de curent continuu.

Breviar teoretic

În regim sinusoidal se defineşte impedanţa $Z=\frac{\underline{U}}{\underline{I}}$ şi admitanţa $Y=\frac{\underline{I}}{\underline{U}}=\frac{1}{Z}$, unde $\underline{U}$ şi $\underline{I}$ reprezintă fazorii tensiunii şi intensităţii curentului electric din figura 1a.

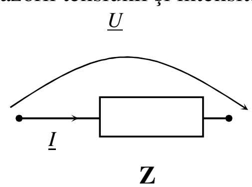

Figura 1a

În general aceste mărimi sînt mărimi complexe, putînd fi scrise sub forma *algebrică*

$$Z=R+jX\ ,\ Y=G+jB$$

R – rezistenţa serie

X – reactanţa serie (cu $X>0$ pentru impedanţe inductive şi cu $X<0$ pentru impedanţe capacitive)

G – conductanţa paralel

B – susceptanţa paralel (cu $B<0$ pentru admitanţe inductive şi cu $B>0$ pentru admitanţe capacitive)

Relaţia de legătură între mărimile impedanţei şi ale admitanţei se obţine simplu

$$R=\frac{G}{G^2+B^2} \qquad X=-\frac{B}{G^2+B^2}$$

Modelul unei reactanţe cu pierderi

Se consideră o reactanţă cu pierderi, avînd la frecvenţa f un factor de calitate Q. Pentru aceasta sînt posibile două modele de circuit: serie şi paralel. În figura 1b sînt desenate cele 2 modele pentru o reactanţă cu pierderi (pierdere = R_S nenul, R_p diferit de infinit).

X poate fi reactanţa unei bobine, respectiv condensator:

$$X_L=\omega L \qquad X_C=-\frac{1}{\omega C}$$

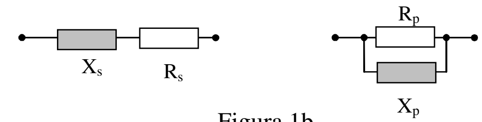

Figura 1b

Pentru cele două modele se definesc factorii de calitate Q_s *şi* Q_p:

$$Q_s=\frac{|X|}{R}=\frac{|X_s|}{R_s}=\frac{\omega L_s}{R_s}=\frac{1}{\omega R_s C_s}$$

$$Q_p=\frac{|B|}{G}=\frac{R_p}{|X_p|}=\frac{R_p}{\omega L_p}=\omega R_p C_p$$

Fiind definiţi pentru *aceeaşi* componentă fizică, cei doi factori de calitate trebuie să fie egali:

$$Q_s=Q_p=Q$$

Se defineşte şi tangenta unghiului de pierderi, D:

$$D=\frac{1}{Q}$$

Relaţiile de legătură între elementele celor două modele, la o frecvenţă fixată f, sînt:

$$X_p=X_s\left(1+\frac{1}{Q^2}\right)=X_s\left(1+D^2\right)$$

$$R_p=R_s\left(1+Q^2\right)$$

Relaţia de echivalenţă între reactanţe se mai poate scrie în funcţie de tipul reactanţei, capacitivă respectiv inductivă, astfel:

$$L_p=L_s\left(1+1/Q^2\right)$$
$$C_s=C_p\left(1+1/Q^2\right) \qquad (1)$$

Principiul măsurării cuadripolare

Atunci cînd se măsoară impedanţe mici, sau cînd sondele de măsură au lungime mare (măsurare distanţă), impedanţa sondelor şi a rezistenţelor de contact poate să nu mai fie neglijabilă, fiind comparabilă cu impedanţa Z_x. Principiul de măsură foloseşte în fiecare capăt al impedanţei două terminale. O pereche de terminale este folosită pentru injectarea curentului prin impedanţa necunoscută Z_x, iar cealaltă pentru măsurarea tensiunii care cade pe Z_x. Conexiunea se numeşte *cuadripolară* datorită celor 4 terminale. Cele 2 perechi de terminale se conectează cît mai aproape de corpul impedanţei.

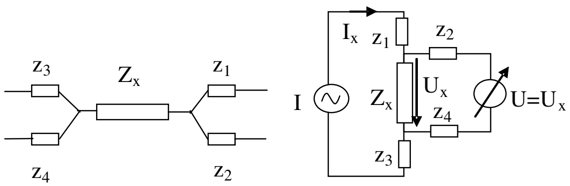

Figura 2a: Modelul cuadripolar

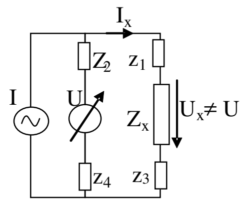

Figura 2b: Modelul bipolar

În figura 2a) este ilustrată conexiunea cuadripolară; se vine cu 2 perechi de fire separate:

- de la sursa I la Z_x, impedanţele (parazite) ale firelor de legătură sînt z_1, z_3
- de la voltmetru la Z_x, impedanţele firelor sînt z_2, z_4

Se observă că z_2 şi z_4 sînt în serie cu voltmetrul care are impedanţa de intrare foarte mare deci sînt neglijabile. z_1 şi z_3 apar în serie cu sursa de curent, cu impedanţa internă mare, aşadar devin şi ele neglijabile. Această schemă permite deci minimizarea efectului celor 4 impedanţe nedorite *mici*, făcîndu-le să apară în serie cu alte impedanţe *mari* care există deja în circuit.

În figura 2b) este ilustrată conexiunea bipolară. Aparatul de măsură conţine sursa I şi voltmetrul U, şi se face legătura cu Z_x prin doar 2 fire de legătură z_1 şi z_3. De aceea, nu se mai pot separa căile de „curent" şi „tensiune" şi se măsoară impedanţa care include şi impedanţa firelor:

$$Z_m = Z_x + z_1 + z_3$$

făcîndu-se o eroare sistematică

$$\varepsilon_{Z_x}{}^{s} = \frac{z_1 + z_3}{Z_x}$$

De exemplu, în cazul măsurării unei rezistenţe *R,* folosind pentru conectare nişte cabluri avînd rezistenţa *r,* se obţine o eroare sistematică, în cazul folosirii configuraţiei bipolare (se folosesc doar două terminale):

$$\varepsilon_R{}^{s} = \frac{2r}{R}$$

Punţi de curent continuu. Puntea Wheatstone

În figura 3 se prezintă schema unei punţi Wheatstone, în care s-a notat cu r_g rezistenţa internă a sursei, iar cu R_V rezistenţa internă a indicatorului de nul (sau a voltmetrului).

Considerînd r_g neglijabil şi R_V foarte mare, tensiunea de dezechilibru este dată de relaţia

$$U_d = E_g \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Puntea este echilibrată atunci cînd $U_d = U_{12} = 0$. La echilibru, între rezistenţele punţii există relaţia

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \tag{4}$$

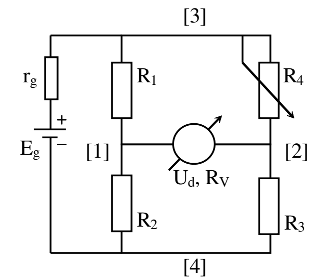

Figura 3

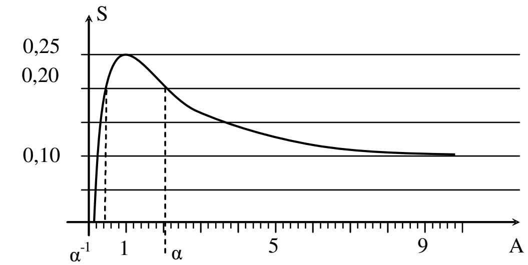

Figura 4

Se defineşte ***raportul punţii A***, ca fiind raportul a *oricare* două rezistenţe *alăturate*, conectate la aceeaşi bornă a *voltmetrului*, cînd puntea este la echilibru.

$$A = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \text{ sau } A = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \tag{5}$$

Factorul de reglaj σ (numit şi dezechilibrul punţii) se defineşte ca:

$$\sigma = \frac{R_4 - R_{40}}{R_{40}}$$

unde cu R_{40} se notează valoarea rezistenţei R_4 cînd puntea este echilibrată (rezistenţele R_1 , R_2 , R_3 sînt rezistenţe fixe)

Pentru $\sigma \to 0$ tensiunea U_{12} poate fi aproximată cu expresia lui U_d

$$U_d = S \cdot E_g \cdot \sigma$$

Sensibilitatea *S* a punţii este:

$$S = \frac{\dfrac{\Delta U_d}{E_g}}{\dfrac{\Delta R_4}{R_4}} = \frac{A}{(1+A)^2} \tag{6}$$

Din această relaţie se obţine că *S(A)=S(1/A)*, de aceea nu contează cum se alege *A* (*R1/R2* sau *R2/R1*) atîta vreme cît sînt 2 rezistenţe care mărginesc voltmetrul.

Dependenţa sensibilităţii *S* în funcţie de *A* este prezentată în figura 4. Se observă că pentru A=α, S(α)=S(α^{-1}).

Desfăşurarea lucrării

1. ***Măsurarea rezistenţelor folosind LCR-metrul***

LCR-metrul este un aparat care permite măsurarea automată, la alegere, a doi parametri ai unei impedanţe (selectabili din butonul **MODE**).

Se iniţializează LCR-metrul folosind **MENU → SETUP →RECALL CALIBRATION→ YES(1) →EXIT**

Se măsoară trei rezistenţe diferite existente la masă cu ajutorul LCR metrului, folosind următoarele setări: **SPEED→MEDI**, **DISPLAY→VALUE**, **MODE →R/Q**, **CIRCUIT→SERIES**. Aceste setări se pot schimba prin apăsarea butoanelor aflate în dreapta ecranului. Frecvenţa de lucru este implicit 1kHz (se verifică pe afişaj; daca nu, se apasă tasta **FREQ** (aceeaşi cu tasta „**-**„), se introduce valoarea dorită şi apoi se apasă tasta **ENTER**). Se determină erorile absolute, ΔR, şi relative, ε_R, ale valorii măsurate de aparat R, faţă de valoarea nominală R_{nom} (cea notată pe rezistenţa măsurată, fie în clar, fie în codul culorilor).

$\Delta R = R - R_{nom}$, $\varepsilon_R = \Delta R/R_{nom}$

Observaţie: în cazul în care toleranţa măsurată depăşeşte cea marcată, sau în general dacă se suspectează că sondele LCR-metrului nu sînt în regulă, se conectează împreună cleştii LCR-metrului şi se verifică că valoarea rezistenţei este cît mai aproape de 0. Dacă observaţi că măcar 1 din cele 4 şuruburi care conectează cele 4 fire la cei 2 crocodili este slăbit, anunţaţi defecţiunea.

2. ***Măsurarea rezistenţei unui fir***

Se vor folosi şi compara conexiunea bipolară şi cea cuadripolară pentru a măsura o rezistenţă de valoare foarte mică (rezistenţa unui fir, care este mult sub un ohm).

a) Se conectează un fir disponibil la masă la sondele de măsură ale LCR-metrului. Se observă că adaptorul conectat la LCR-metru foloseşte 4 borne, măsurarea fiind cuadripolară, fiecare din cei doi „cleşti" conectînd 2 borne la cîte un terminal al impedanţei necunoscute, ca în figura 2a.

Se notează valoarea indicată pentru rezistenţa firului, R_{cuadri} .

b) Se măsoară rezistenţa mică (acelaşi fir) la ohmetrul multimetrului numeric (butonul Ω), care are conexiune bipolară (2 terminale); se conectează capetele firului care se doreşte a fi măsurat la cei 2 crocodili ai ohmetrului. Se notează valoarea indicată, $R_{bipolar}$. Se calculează eroarea relativă la măsurarea bipolară faţă de cea cuadripolară. De ce obţine o diferenţă aşa mare (poate fi peste 100%) între cele două valori măsurate (la punctele ***a*** şi ***b***)?

c) Se scoate firul măsurat şi se conectează cei doi crocodili ai ohmetrului direct între ei. Se notează valoarea indicată, $R_{fire\_legătură}$. Această valoare reprezintă eroarea sistematică absolută făcută la măsurarea firului.

d) Se determină valoarea rezistenţei firului măsurat prin *corecţia erorii sistematice*, $R_{fir\ bipolar\ corectat}$ astfel: se scade valoarea rezistenţei cablurilor cu crocodili de la ***c*** din valoarea măsurată la punctul ***b***. Se determină eroarea relativă a acestei valori faţă de valoarea determinată la punctul ***a***.

Cum e această eroare relativă faţă de cea de la **b** ? de ce ?

De ce la punctul ***a*** (măsurare 4T) nu a mai fost necesară corecţia erorii sistematice adică determinarea rezistenţei sondelor (firelor de legătură) ?

3. ***Măsurarea unor condensatoare şi bobine***

a) *măsurarea capacităţilor*

Se măsoară două capacităţi (de tipuri şi valori diferite) existente la masă.

- un condensator stiroflex (polistiren) de 100 ... 400pF
- un condensator ceramic multistrat de 1nF... 100nF

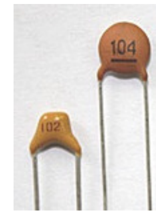

Fig. 5 condensatoare ceramice

condensator stiroflex

Pentru aceasta se trece în modul **MODE→C/D**, model serie (**CIRCUIT→SERIES**) şi se notează valorile C_s şi D. Se selectează apoi modelul paralel (**CIRCUIT→PARALL**) şi se notează valoarea C_p. Valoarea lui D este aceeaşi. Se calculează $Q = \frac{1}{D}$. Ce tip de condensator are cel mai mare Q? Cum sînt valorile C_s şi C_p? De ce?

Se determină rezistenţa parazită a condensatoarelor: se trece în modul de afişare **MODE→C/R** şi se determină valoarea rezistenţei parazite pentru modelul serie (R_s). Pe baza relaţiilor de legătură şi a Q calculat, se calculează rezistenţa paralel R_p. Care dintre ele e mai mare ?

b) *măsurarea inductanţelor*

Se măsoară inductanţa existentă la masă. Se trece în modul **MODE→L/Q** şi se măsoară pentru inductanţă modelul serie (L_s şi Q), (**CIRCUIT→SERIES**), şi modelul paralel (L_p şi Q), (**CIRCUIT→PARALL**). Se calculează valoarea factorului de calitate Q_{calc} din relaţia de legătură (1) între L_s şi L_p.

Se măsoară valoarea rezistenţei pentru modelul serie R_s. Ce semnificaţie fizică are R_S la bobină?

Comparaţi valoarea Q la bobină faţă de cele de la condensator !

4. ***Măsurarea unui grup RC***

a) Se măsoară **separat** o rezistenţă R de aproximativ 10 kΩ pe modul C/R, şi condensatorul de valoarea **cea mai mică** disponibilă la masă (sute de pF) pe modul C/D (C_S , D).

Apoi, pe placa de test, se realizează un grup RC serie: se conectează în serie R cu C, legînd cei 2 cleşti ai LCR-metrului direct la terminalele extreme ale grupului (nu este indicat să folosiţi fire adiţionale).

Se procedează ca la punctul 3, la măsurarea condensatoarelor, doar că acum se măsoară un grup, nu un condensator singur. Frecvenţele de lucru vor fi de 1kHz şi 100KHz. Se măsoară elementele modelului serie (C_s, D) şi ale modelului paralel (C_p, D). Se determină indirect Q=1/D. Se calculează Q_{calc} al grupului din relaţia (1) de trecere de la modelul serie la modelul paralel.

Se determină rezistenţa grupului RC: se trece în modul de afişare **MODE -> C/R** şi se determină valoarea rezistenţei pentru modelul serie (R_s) respectiv modelul paralel (R_p).

Se calculează reactanţa condensatorului singur $X_C = 1/\omega C_S$ la frecv. de lucru.

b) se repetă cu aceleaşi componente R,C pentru un grup RC paralel.

c) se interpretează rezultatele:

- ce se întîmplă cu Q al grupului faţă de Q al condensatorului singur? în ce caz (S/P) se modifică mai mult şi de ce?
- am măsurat un grup *real* S sau P (realizat fizic prin înserierea, respectiv punerea în paralel a unui R şi unui C) pe modurile *echivalente* S/P (*model matematic* S/P). În care caz valorile măsurate pentru C sînt mai aproape de C real (singur), atunci cînd modul real e la fel cu cel echivalent sau atunci cînd sînt diferite?
- la cele 2 frecvenţe de măsură, în care caz valorile măsurate pentru C diferă mai mult faţă de C real (singur)? Observaţi că într-un caz (circuit S sau P) erorile sînt mai mari la frecvenţe mari, şi în celălalt caz la frecvenţe mici. Explicaţi de ce (*indicaţie:* comparaţi valoarea R real cu X_C şi gîndiţi-vă ce înseamnă punerea în serie, respectiv paralel a unor valori ale rezistenţei/reactanţei f. diferite).

5. *Măsurarea rezistenţelor cu ajutorul punţii de curent continuu*

a) *echilibrarea punţii*

Se realizează pe placa de test o punte de curent continuu. Valorile nominale pentru R_1, R_2, R_3 sînt respectiv [1..5] kΩ (depinde de masă), 10kΩ şi 10kΩ. Rezistenţa R_4 este o rezistenţă variabilă (numită şi *trimer* sau potenţiometru semireglabil) cu valoare nominală între 1 şi 5 kΩ (dep. de masă). Trei exemple de trimere, precum şi schema echivalentă, sînt date în fig. 7. Rezistenţele măsurate între cele 3 terminale ale unui trimer, respectă regula:

$$R_{12} + R_{23} = R_{13} = \text{ct.}$$

unde valoarea R_{13} este valoarea nominală a trimerului (fixă, indiferent de reglaj). Terminalul central 2 se numeşte *cursor* şi poziţia sa depinde de şurubul de reglaj. Deci, pentru un trimer de 1KΩ, în funcţie de poziţia cursorului, putem avea de exemplu:

$$R_{12} = 100\Omega,\ R_{23}=900\Omega,\ R_{13}= 1K\Omega$$

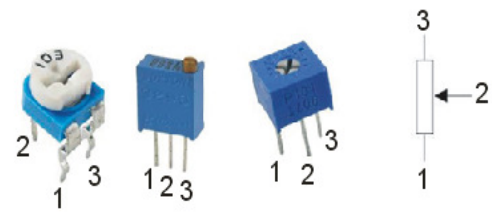

Fig. 7 rezistenţă semireglabilă; $R_{12} + R_{23} = R_{13}$

Se observă deci că, dacă se conectează doar terminalele 1-2 sau 2-3 în circuit, în funcţie de reglaj vom avea o rezistenţă între 0 şi R_{13} . În nici un caz nu se vor conecta terminalele 1 şi 3, căci valoarea va fi fixă şi nu vom mai putea efectua reglajul! Se mai observă că putem conecta terminalul liber la cursor, ca în fig. 3, sau îl putem lăsa neconectat, rezultatul fiind acelaşi – oricum ar fi, d.p.d.v. echivalent trebuie ca trimerul să aibă *două* terminale în circuitul punţii.

În figura 8 este reprezentată o variantă posibilă de realizare a punţii din figura 3 pe placa de test. Se folosesc fire pentru conectarea voltmetrului de c.c., care măsoară $U_d = U_{12}$ = tensiunea de dezechilibru, şi a sursei de curent continuu, reglată la valoarea 3V.

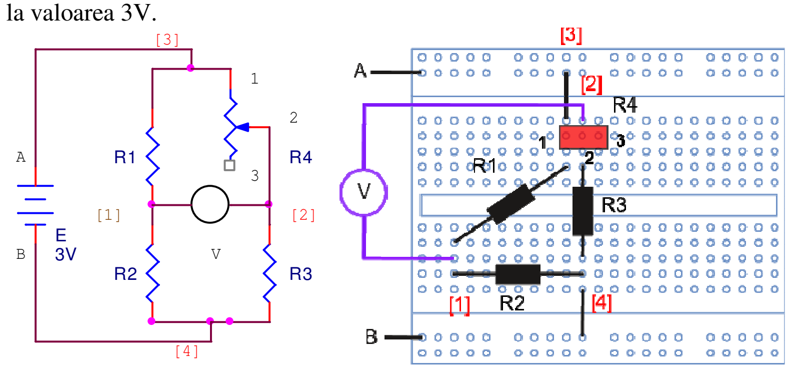

Fig. 8 Exemplu de realizare a punţii Wheatstone

- Se măsoară cele 3 rezistenţe (înainte de a le conecta în circuit). Se desenează schema punţii realizate, notînd pe schemă rezistenţele alese şi valorile lor *măsurate* (nu cele *nominale*) şi notînd capetele celor 2 diagonale ([1]-[2] şi [3]-[4]).

Observaţie importantă: Dacă nu scrieţi valoarea măsurată deasupra fiecărei rezistenţe (identificîndu-le cu poziţiile lor pe placă), nu veţi mai putea distinge cele 2 rezistenţe de 10k între ele, după ce le-aţi deconectat de la LCR-metru !

- Se reglează sursa de tensiune continuă la valoarea E=3V (din comutatorul sursei). Se măsoară cu voltmetrul de c.c. valoarea exactă a tensiunii de alimentare E. *Observaţie:* pt. această aplicaţie, nu contează polaritatea tensiunii de alimentare.

- Se conectează sursa şi voltmetrul de c.c. ca în schemă, apoi se aduce puntea la echilibru prin reglarea potenţiometrului pînă cînd indicaţia voltmetrului va fi $U_d=0$ (sau valoarea cea mai mică în modul ce se poate obţine practic).

Observaţie: prin reglarea trimerului la cele 2 valori extreme, trebuie ca tensiunea măsurată să treacă prin valori atît pozitive, cît și negative, obţinîndu-se 0 la echilibru. Dacă, oricît ar fi reglat trimerul, tensiunea nu își schimbă semnul, înseamnă că puntea nu poate fi echilibrată (nu a fost realizată corect, valorile rezistenţelor nu permit obţinerea egalităţii din (4) indiferent de valoarea trimerului).

- Se măsoară cu ohmetrul (setat pe modul de măsură Ω) valoarea la care s-a reglat potenţiometrul, astfel:

- se *desfac conexiunile* potenţiometrului la circuit, fără a-l scoate fizic de pe placă (de exemplu se scoate temporar R_3 de pe placă; este suficient să se elimine conexiunile la un singur pin dintre cei 2 pini folosiți ai potențiometrului). Dacă nu se face acest pas, se va măsura o valoare eronată, în paralel pe R_4 avînd grupul serie format din R_1,R_2,R_3. În plus, sursa de c.c. *nu* trebuie să aplice tensiune asupra unei rezistenţe în momentul măsurării acesteia!
- se măsoară cu ohmetrul valoarea de echilibru, $R_{40\ măsurat}$, folosind 2 fire înfipte în placa de test, în rînduri de găuri care să corespundă celor 2 din 3 terminale ale potenţiometrului care au fost folosite (pe fig. 8 s-au folosit terminalele 1 și 2), și conectîndu-le celălalt capăt la crocodilii ohmetrului.

- Se compară valoarea $R_{40\ măsurat}$ măsurată pentru potenţiometru (la echilibru) cu valoarea de echilibru $R_{40\ calc}$ calculată cu relaţia de echilibru a punţii (4) pe baza valorilor *măsurate* ale rezistenţelor 1,2,3. Se calculează eroarea relativă a valorii măsurate.

Explicaţi de ce cele 2 valori diferă, deşi atît valoarea $R_{40\ măsurat}$, cît şi $R_{40\ calc}$ se bazează pe valori ale unor rezistenţe măsurate cu acelaşi aparat (ohmetrul), deci nu eroarea ohmetrului este cauza. Care sînt sursele acestei erori ?

Observaţie: voltmetrul are intrare *flotantă* – nici una din bornele de intrare nu e conectată la carcasă; de asemenea, sursa de c.c. are ieșire flotantă. Dacă s-ar folosi atît sursa, cît și voltmetru neflotant (cum este de exemplu milivoltmetrul de c.a. cu intrare pe mufă BNC și a generatorului de c.a. cu ieșire BNC), masele celor 2 aparate, fiind ambele legate la împămîntare, ar fi comune; masa ar apărea în punctele 1 şi 4 (sau 2,4) din fig. 3, scurtcircuitînd rezistenţa R_2, respectiv R_3.

b) *determinarea configuraţiei pentru care sensibilitatea este maximă*

Relaţia (4) este aceeaşi indiferent de diagonalele în care se conectează voltmetrul şi sursa. Se urmăreşte determinarea experimentală a diagonalei care asigură sensibilitate (6) maximă. Reamintim că un aparat este mai sensibil decît altul atunci cînd ieșirea este mai mare, la aceeași intrare.

Pentru configuraţia deja realizată pe placă, se reconectează potenţiometrul şi se variază *uşor* pînă cînd voltmetrul indică U_{d1}=20mV. Se observă că, cf. fig. 8, voltmetrul este conectat în diagonala [1]-[2] şi sursa în [3]-[4]. Se inversează apoi voltmetrul cu sursa de semnal (prin mutarea firelor voltmetrului pe diagonala 3-4 şi a sursei pe diagonala 1-2) şi, *fără a mai modifica valoarea potenţiometrului*, se citeşte

indicaţia voltmetrului U_{d2}, care va fi diferită de U_{d1} – mai mare sau mai mică. Care configuraţie este mai sensibilă? Justificaţi !

Se calculează raportul punţii *A* (relaţia (5)) şi sensibilitatea *S* (relaţia (6)) pentru cele două situatii, $A_{1\text{-}2}$, $S_{1\text{-}2}$, $A_{3\text{-}4}$, $S_{3\text{-}4}$, pe baza valorilor măsurate a celor 4 rezistenţe. În care caz sensibilitatea calculată e mai mare? Pentru ce valoarea A sensibilitatea este maximă? Se compară cu determinările experimentale.

Întrebări pregătitoare

1. Pentru o bobină se măsoară L_p=400mH şi Q=50, la frecvenţa f=1kHz. Să se determine rezistenţa R_p şi valoarea bobinei pentru modelul serie, L_s.
2. Să se calculeze factorul de calitate pentru un grup RC serie avînd C_s=10nF şi R_s=50Ω, la frecvenţa 1kHz.
3. Să se calculeze factorul de calitate pentru un grup RC paralel avînd C_p=10nF şi R_p=1MΩ, la frecvenţa 1kHz.
4. Pentru o bobină se măsoară L_s=10mH şi Q=10, la frecvenţa f=1kHz. Să se determine rezistenţa R_s şi valoarea bobinei pentru modelul paralel, L_p.
5. Pentru un condensator se măsoară C_s=200nF şi Q=1000, la frecvenţa f=10kHz. Să se determine rezistenţa R_s şi tangenta unghiului de pierderi, $D=tg\delta$.
6. Se măsoară o rezistenţă folosind conexiunea bipolară (doar două terminale). Valoarea rezistenţei este R=50Ω. Rezistenţa cablurilor este de 0,5Ω. Să se determine eroarea sistematică făcută la măsurarea rezistenţei.
7. Pentru puntea din figura 10 să se calculeze rezistenţa R_x la echilibru şi sensibilitatea S a punţii.

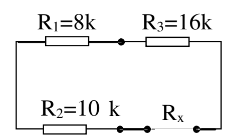

Figura 9

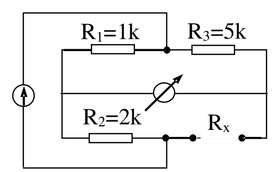

Figura 10

8. Pentru o impedanţă inductivă se măsoară L_p=202mH şi L_s=200mH. Să se determine factorul de calitate al impedanţei.
9. Să se arate că *S* are aceeaşi valoare, indiferent de modul în care este definit raportul punţii $A=\frac{R_1}{R_2}$ sau $A=\frac{R_2}{R_1}$
10. Pentru o punte Wheatstone, tensiunea de dezechilibru are valorile
$U_{d1}=11mV$ pentru $R_{4.1}=1{,}011k\Omega$
$U_{d2}=-11mV$ pentru $R_{4.2}=0.989k\Omega$
Să se determine valoarea rezistenţei R_{40} pentru a aduce puntea la echilibru.
11. Să se stabilească diagonala în care trebuie conectat voltmetrul pentru maximizarea sensibilităţii punţii din figura 9. Cît este raportul A al punţii şi sensibilitatea în acest caz ?