

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris
C.Z.U.: 621.3.011.21.56

NICOLAEV PAVEL

**MĂSURĂTOARE DE IMPEDANȚĂ CU REZONANȚĂ
SIMULATĂ ÎN COORDONATE CARTEZIENE**

273.02 METODE DE ȘI SISTEME DE CONTROL ÎN METROLOGIE

**Autoreferatul
tezei de doctor în tehnică**

CHIȘINĂU, 2018

**Teza a fost elaborată în cadrul departamentului „Telecomunicații”
a Universității Tehnice a Moldovei**

Conducător științific:

NASTAS Vitalie - doctor în tehnică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei

Referenți oficiali:

1. **ZET Cristian** - doctor inginer, profesor universitar, Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” Iași, Romania
2. **TARLAJANU Alexandru** - doctor în tehnică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei

Componența Consiliului Științific Specializat

1. **DIMITRACHI Sergiu** – **președinte CȘS**, m.c. AȘM, doctor habilitat în tehnică, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei
2. **ZAPOROJAN Sergiu** – **secretar CȘS**, doctor în tehnică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei
3. **FOȘALĂU Cristian** – **membru CȘS**, doctor inginer, profesor universitar, Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” Iași, Romania
4. **CHICIUC Andrei** – **membru CȘS**, doctor în tehnică, conferențiar universitar, președinte ANACEC
5. **LUNCĂ Eduard** – **membru CȘS**, doctor inginer, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” Iași, Romania
6. **AVRAM Ion** – **membru CȘS**, doctor în tehnică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Susținerea va avea loc la 30 iunie 2018, ora 12-00, în Ședința Consiliului Științific Specializat D 31 273.02-01 din cadrul Universității Tehnice a Moldovei pe adresa: bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168, blocul de studii Nr.1, aud. 1-205, MD-2004, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctor și autoreferatul pot fi consultate la Biblioteca Tehnico-Științifică a Universității Tehnice a Moldovei și la pagina web a C.N.A.A. www.cnaa.md

Autoreferatul a fost expediat la 29 05 2018

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,
Zaporojan Sergiu, dr., conf. univ.

Conducător științific:
Nastas Vitalie, dr., conf. univ.

Autor:
Nicolaev Pavel



© Nicolaev Pavel, 2018

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea temei și descrierea situației în domeniu. Progresul vertiginos în domeniul electronicii și electrotehnicii este determinat în mare măsură de utilizarea unor măsurătoare de mărimi electrice cu caracteristici metrologice înalte. Actualmente pe piață există aparataj de măsurare a mărimilor electrice bazat pe diverse metode și principii de măsurare caracterizat prin performanțe metrologice înalte, valabile însă doar în anumite condiții de utilizare. Această problemă este caracteristică în special pentru aparatajul de măsurare a impedanțelor. Din aceste considerente, devine actuală problema cercetărilor referitoare la elaborarea unor noi metode și aparataje pentru măsurarea componentelor impedanțelor, care s-ar caracteriza prin performanțe metrologice înalte, universalitate și simplitate în utilizare, structură simplă și preț redus.

Măsurarea cu precizie înaltă a componentelor impedanțelor se realizează prin intermediul metodelor de măsurare directă prin echilibrare. Precizia măsurării conform acestor metode este determinată în primul rând de precizia elementului de referință, care în circuitele de măsurare execută funcția de reproducere a unei mărimi de referință, omogenă cu mărimea măsurată. Elementul de referință determină și unele caracteristici uzuale ale aparatului de măsurare, așa ca algoritmul de măsurare, simplitatea utilizării, prețul de cost și altele. Utilizarea simulatoarelor metrologice de impedanță în calitate de elemente de referință în circuitele de măsurare a impedanțelor deschide noi perspective de îmbunătățire a caracteristicilor tehnice ale aparatajului din această ramură.

Actualmente, pentru măsurarea mărimilor electrice pasive se utilizează dispozitive bazate pe diverse metode de măsurare. Multimetrele asigură măsurarea mărimilor pasive prin intermediul metodelor indirecte de măsurare, de aceea, ele se caracterizează prin precizie mică de măsurare. Printre metodele de echilibrare ce asigură o precizie mai înaltă o răspândire largă au punțile de curent alternativ și metodele de rezonanță în circuitele de măsurare [1]. Însă măsurătoare de impedanță bazate pe aceste metode au o serie de neajunsuri. În primul rând, în circuitele de măsurare sunt utilizate elemente reactive reglabile sau cutii de reactanțe, ceea ce contribuie la micșorarea preciziei, mărirea dimensiunilor și creșterea prețului de cost. De asemenea, în aceste circuite sunt necesare diverse comutări determinate de diversitatea tipului și caracterului mărimii măsurate. De multe ori procesul de echilibrare constă din mai multe etape în care este necesară variația repetată a elementelor variabile. În plus, este necesară alegerea elementelor reglabile astfel, încât să fie posibilă realizarea procesului de echilibrare și acesta să se efectueze printr-un număr minim de reglaje succesive ale acestor elemente. Prin intermediul metodelor propuse nu pot fi măsurate mărimile electrice pasive de orice caracter (activ, reactiv

sau complex), de orice tip al circuitului echivalent de substituție (în serie sau paralel) fără a modifica structura circuitului de măsurare. Din considerentele utilizării elementelor reactive reglabile, tipul și caracterul mărimii de referință nu pot fi dirijate digital și astfel întregul proces de măsurare nu poate fi automatizat. Pentru excluderea acestor neajunsuri este necesară elaborarea unor noi aparataje de măsură a impedanțelor bazate pe efectul rezonanței simulate, de aceea problema abordată în prezenta lucrare este de actualitate.

Scopul și obiectivele lucrării. Scopul lucrării constă în elaborarea și cercetarea mijloacelor de măsurare a componentelor impedanței în coordonate carteziane pe baza efectului rezonanței simulate, care se caracterizează prin precizie înaltă, universalitate în utilizare, simplitate în construcție și în aplicarea practică.

În acest scop a fost necesară soluționarea următoarelor probleme:

1. Analiza metodelor și mijloacelor moderne de măsurare a impedanțelor cu scopul depistării neajunsurilor și determinării posibilității de utilizare a metodei rezonanței simulate.
2. Cercetarea particularităților impedanțelor simulate și analiza posibilităților de utilizare a acestora în calitate de elemente de referință în circuitele de măsurare.
3. Sinteza simulatorului de impedanță în coordonate carteziane cu caracteristici avansate și analiza caracteristicilor metrologice ale acestuia.
4. Analiza circuitului de măsurare a impedanțelor bazat pe efectul rezonanței simulate și elaborarea algoritmilor de echilibrare a acestuia.
5. Elaborarea măsurătorului de impedanță în coordonate carteziane pe baza efectului rezonanței simulate.

Metodologia cercetărilor științifice. La soluționarea problemelor formulate pentru cercetare au fost utilizate teoria semnalelor și circuitelor electrice liniare, teoria grafurilor de fluentă, bazele teoretice ale tehnicii numerice, metodele clasice ale algebrei liniare, teoria erorilor de măsurare, tehnică de calcul cu soft-urile: „Microsoft Excel”, „Microsoft Visio” „Orcad”, „Multisim”, „Matlab”, „Origin”, precum și verificarea experimentală a rezultatelor cercetărilor teoretice.

Noutatea științifică. Noutatea științifică a lucrării constă în următoarele:

1. Demonstrarea prin analiză teoretică și realizare practică a posibilității aplicării metodei rezonanței simulate pentru măsurarea cu precizie înaltă a ambelor componente ale impedanțelor de orice caracter prin metoda comparării simultane cu măsura.
2. Demonstrarea prin analiza teoretică și realizare practică a posibilității aplicării simulatoarelor metrologice de impedanță în calitate de elemente de referință în circuite cu rezonanță simulată de măsurare a componentelor activă și reactivă ale impedanței.

3. Sinteza și analiza prin intermediul grafurilor de fluentă a simulatorului metrologic de impedanță în coordonate carteziane cu conectarea asimetrică și determinarea condițiilor de stabilitate funcțională a acestora.

4. Demonstrarea prin analiza teoretică și verificare practică a expresiilor matematice de determinare a valorii erorilor sistematice pentru componentele activă și reactivă a impedanței reproduse de simulatorul metrologic, precum și a valorii erorilor sistematice pentru defazajului dintre aceste componente.

5. Modelarea și cercetarea circuitului metrologic rezonant de tip serie cu simulator metrologic de impedanță în componența sa și elaborarea algoritmilor de echilibrare a acestuia în regim de echilibrare parțială și totală.

6. Elaborarea impedanțmetrului în coordonate carteziane bazat pe efectul rezonanței simulate, analiza principiului de funcționare și a modului de utilizare practică a acestuia.

Semnificația teoretică a lucrării

1. Au fost analizate metodele actuale de măsurare a impedanțelor prin sistematizarea și clasificarea acestora după criteriile elocvente, de asemenea, fiind concretizate și neajunsurile esențiale ale acestora.

2. A fost demonstrată posibilitatea utilizării metodei rezonanței simulate la măsurarea componentelor impedanței în coordonate carteziane.

3. A fost elaborată prin metoda grafurilor de fluentă structura simulatorului metrologic de impedanță în coordonate carteziane cu caracteristici avansate, care asigură reproducerea impedanțelor de referință de orice tip și caracter cu posibilitatea reglării independente brută și lină a componentelor impedanței reproduse.

4. A fost aplicată metoda grafurilor de fluentă la determinarea condițiilor de stabilitate funcțională a simulatorului metrologic de impedanță.

5. Au fost determinate componentele erorii sistematice cauzată de factorii de neidealitate ai elementelor active din componența simulatoarelor, de toleranța elementelor pasive, de instabilitatea frecvenței semnalului de măsurare și de variația temperaturii.

6. A fost examinată posibilitatea utilizării simulatorului metrologic de impedanță în circuite rezonante de măsurare de tip serie.

7. A fost elaborat algoritmul de echilibrare a circuitelor de măsurare a componentelor impedanțelor în coordonate carteziane.

Valoarea aplicativă a lucrării

1. A fost elaborată structura simulatorului metrologic de impedanță care asigură reproducerea impedanțelor simulate de referință în coordonate carteziane și reglarea lor independentă în benzi largi de valori.

2. Au fost elaborați algoritmi de echilibrare parțială și totală a circuitelor rezonante de măsurare de tip serie pe bază de simulatoare de impedanță în coordonate carteziane.

3. A fost elaborat și realizat practic modelul impedanțmetrului de laborator, care asigură măsurarea componentelor impedanței prin metoda rezonanței simulate.

4. A fost propus principiul de automatizare a procesului de măsurare a impedanțmetrului și descris modul de conectare a acestuia la calculatorul personal.

Rezultatele științifice înaintate spre susținere

1. Conceptul metodologic de utilizare a simulatoarelor metrologice de impedanță în calitate de elemente de referință în măsurătoarele de impedanță cu rezonanță simulată în coordonate carteziane.

2. Structura simulatorului de impedanță în coordonate carteziane precum și metoda de sinteză și analiză funcțională bazată pe aplicarea grafurilor de fluentă a acestei structuri

3. Modelul matematic, obținut prin metoda grafurilor de fluentă, care asigură determinarea condițiilor de stabilitate a simulatorului metrologic de impedanță, precum și determinarea valorilor componentelor erorii sistematice.

4. Modelul circuitului rezonant de măsurare de tip serie pe baza simulatoarelor de impedanță în coordonate carteziane precum și algoritmi de măsurare a componentelor impedanței în cadrul acestui circuit.

5. Structura și principiul de funcționare a impedanțmetrului cu rezonanță simulată în coordonate carteziane, caracterizat prin precizie înaltă, simplitate a algoritmului de măsurare, universalitate în utilizare și automatizare a procesului de măsurare.

Implementarea rezultatelor științifice. În prezenta teză a fost confirmată posibilitatea de aplicare practică a rezultatelor cercetărilor teoretice referitoare la utilizarea efectului rezonanței simulate în procesul de măsurare a mărimilor electrice pasive. Drept urmare, a fost elaborat un impedanțmetru de laborator bazat pe metoda rezonanței simulate, iar principiul de funcționare și modul de utilizare a acestuia au fost incluse într-un ghidul de laborator intitulat „Măsurarea impedanței prin metoda rezonanței simulate” editat la UTM [2]. Totodată, rezultatele cercetărilor au fost prezentate la 14 Expoziții Internaționale de Inventică unde au fost apreciate cu 5 medalii de aur, 6 de argint și 3 de bronz.

Aprobarea rezultatelor științifice. Rezultatele prezentate în teză au fost expuse, analizate și aprobate la următoarele conferințe, expoziții și simpozioane științifice: International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics „ICTEI”, Chișinău, 2008, 2010, 2012, 2015, 2018; International Conference on Electrical and Power Engineering „EPE”, Iași, 2010; International Conference Microelectronics and Computer Science „ICMCS”, Chișinău, 2009; International Conference of Electromechanical and Power Systems „SIELMEN”, Iași, Chișinău, 2009, 2011; International Conference of Young Researchers, Chișinău, 2009; Conferința tehnico-științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, Chișinău, 2007, 2008, 2009, 2012; European exhibition of creativity and innovation „EUROINVENT”, Iași, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014; Expoziția internațională specializată „INFOINVENT”, Chișinău, 2009, 2011, 2013, 2015; Salonul internațional de invenție „PROINVENT”, Cluj-Napoca, 2011, 2012, 2013, 2014; Salonul Internațional „INOVA”, Zagreb, Croația, 2014.

Publicații la tema tezei. În baza cercetărilor efectuate au fost publicate 17 de lucrări științifice dintre care 9 – de un singur autor și 3 – în reviste recenzate, au fost obținute 10 brevete de invenție, iar rezultatele au fost prezentate și incluse în cataloagele a 14 Expoziții Internaționale de Invenții.

Volumul și structura tezei. Lucrarea este alcătuită din introducere, cinci compartimente, concluzii generale și recomandări, bibliografie cu 173 titluri, 6 anexe, 70 figuri și 8 tabele.

CONȚINUTUL TEZEI

În **Introducere** se argumentează actualitatea temei de cercetare, se expune scopul și obiectivele lucrării, noutatea științifică a rezultatelor obținute, semnificația teoretică și valoarea aplicativă a lucrării, tezele principale înaintate spre susținere, implementarea rezultatelor și lista conferințelor la care au fost expuse rezultatele de bază ale lucrării.

În **primul capitol „Metode moderne de măsurare a componentelor impedanței”** este efectuată o analiză a particularităților impedanței, dar și a metodelor de măsurare a acestora cu clasificarea după criteriile elocvente. La descrierea impedanței se pune accentul pe proprietățile care determină particularitățile specifice de măsurare ale acestora. Se introduce noțiunea de impedanță simulată și se precizează proprietățile prin care se deosebește de impedanța clasică. La analiza metodelor de măsurare a impedanței în calitate de criterii de clasificare se consideră: modul de comparare a mărimii necunoscute cu măsura; modul de realizare a experimentului fizic, dar și relația dintre valoarea de referință și cea necunoscută, care exprimă legătura dintre

aceste mărimi sau tipul ecuației de măsurări. Conform acestor criterii, se elaborează schema de clasificare cu specificarea locului fiecărei metode de măsurare. În continuare, se descriu metodele de măsurare de largă utilizare în practică cu specificarea principiului de realizare a circuitului de măsurare, structura unui dispozitiv care are la bază respectiva metodă, dar și neajunsurile ce le implică acestea. Din analiza acestor neajunsuri se determină perspectivele de utilizare a metodei rezonanței simulate la măsurarea componentelor impedanței.

În **capitolul doi „Simulatoare metrologice de impedanță”** este sintetizat și analizat funcțional simulatorul metrologic de impedanță cu structură algoritmică. Inițial se efectuează o analiză a simulatoarelor de impedanță existente, se deduc cerințele ce trebuie respectate de acestea spre a putea fi utilizate la reproducerea mărimilor de referință și se clasifică simulatoarele de impedanță după criteriile elocvente. Conform acestor criterii, se descriu simulatoarele de impedanță existente cu specificarea domeniului de utilizare și se determină perspectiva elaborării unor simulatoare cu structură algoritmică [3-6]. La sinteza simulatorului metrologic de impedanță (SMI) se utilizează metoda grafului de fluentă [7]. Inițial, cu ajutorul grafurilor de fluentă, se elaborează algoritmul de transformare a informației în structura simulatorului (figura 1). Utilizând formula lui Mason, obținem transmitanța globală:

$$Z_i = -\frac{R \cdot K_1 + R \cdot jK_2}{1 - (-K_1 - jK_2 + K_1 + jK_2)} = -(K_1 \cdot R + jK_2 \cdot R) \equiv R_i + jX_i \quad (1)$$

După cum rezultă din (1), impedanța Z_i reprodusă de un simulator ce are la bază algoritmul de transformare a informației conform grafului din figura 1 este exprimată în coordonate carteziene în forma sumei componentelor activă R_i și reactivă X_i . Componenta activă $R_i = -K_1 \cdot R$ este dependentă doar de coeficienții K_1 și R , iar componenta reactivă $X_i = -K_2 \cdot R$ de coeficienții K_2 și R . Reglarea independentă a coeficienților K_1 și K_2 ar avea drept rezultat reglarea independentă a valorii componentelor activă și respectiv reactivă a impedanței reproduse [8].

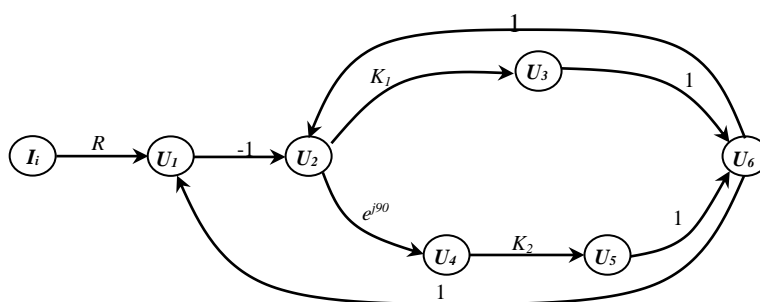


Fig. 1. Graful algoritmului de transformare a informației în SMI

Pe baza algoritmului de transformare a informației reprezentat în figura 1 se elaborează schema-bloc a SMI (figura 2) [9].

La elaborarea acesteia, fiecărei laturi din graf i se atribuie un bloc funcțional. Blocul respectiv va avea coeficient de transfer egal cu transmitanța laturii respective.

În figura 2, SMI este alcătuit dintr-un convertor curent-tensiune bazat

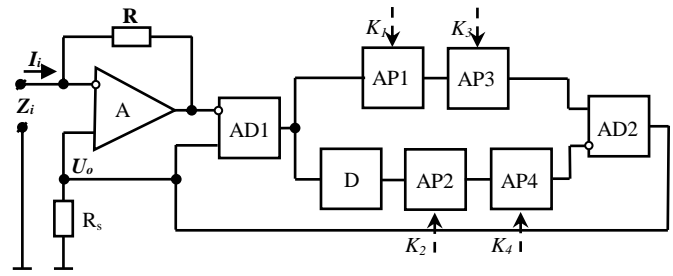


Fig. 2. Schema de structură a SMI

pe amplificatorul A și rezistorul R, două amplificatoare diferențiale AD, un defazor la 90^0 - D și patru amplificatoare programabile AP. AP1 și AP2 asigură modificarea valorilor componentelor impedanței reproduse în banda de valori dată, iar AP3 și AP4 – modificarea benzi de valori.

Pe baza schemei-bloc prezentată în figura 2 a fost elaborată schema principală a simulatorului metrologic de impedanță (figura 3) [10]. Toate componentele sale sunt implementate pe baza amplificatoarelor operaționale (AO) [11].

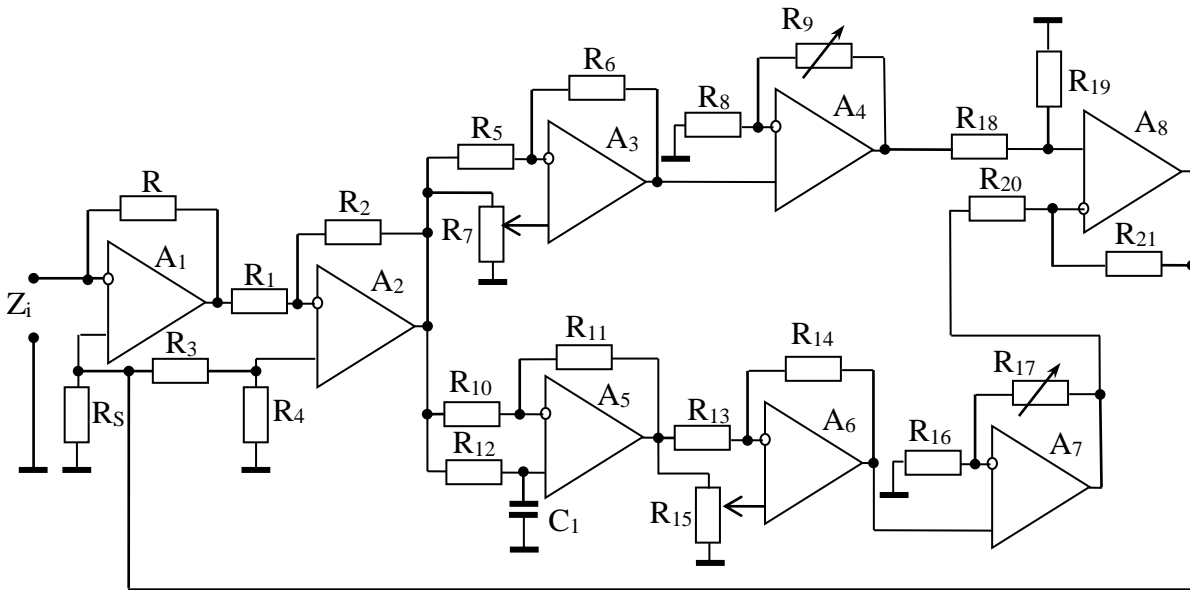


Fig. 3. Circuitul principal al SMI

Pentru determinarea valorii impedanței reproduse de SMI a cărui circuit este reprezentat în figura 3 se utilizează aceeași metodă a grafului de fluentă [12]. Transmitanța globală a grafului constituie impedanța de intrare Z_i a SMI:

$$Z_i = \frac{U_o}{I_i} = R \cdot (1 - 2\rho) \cdot (1 + n) - jR \cdot (1 - 2\delta) \cdot (1 + m) \equiv R_i + jX_i \quad (3)$$

unde componentele activă și reactivă au valorile:

$$\begin{aligned} R_i &= R \cdot (1 - 2\rho) \cdot (1 + n); \\ X_i &= -R \cdot (1 - 2\delta) \cdot (1 + m). \end{aligned} \quad (4)$$

Conform relației (4) se observă:

a) coeficienții de amplificare ce asigură reglarea lină a componentei active și reactive a impedanței reproduse:

$$\begin{aligned} K_1 &= 1 - 2\rho \\ K_2 &= 1 - 2\delta \end{aligned} \quad (5)$$

unde: ρ, δ - caracteristica de includere în circuit a rezistorului R_7 , respectiv R_{15} , ce variază în intervalul $(0 \div 1)$, ceea ce asigură modificarea K_1 , respectiv K_2 , în intervalul $(-1 \div +1)$;

b) coeficienții de amplificare ce asigură reglarea în trepte a componentei active și reactive a impedanței reproduse:

$$\begin{aligned} K_3 &= 1 + n \\ K_4 &= 1 + m \end{aligned} \quad (6)$$

unde: n, m – raportul dintre valorile rezistențelor R_9 și R_8 , respectiv R_{17} și R_{16} . Pentru a asigura reglarea în trepte, n și m iau valori discrete, iar componentele activă și reactivă variază în intervalul $[-R(1+n) \div +R(1+n)]$, respectiv $[-R(1+m) \div +R(1+m)]$.

După elaborarea structurii simulatorului de impedanță, prin metoda grafurilor de fluentă, se determină condițiile de stabilitate funcțională a acestora. Stabilitatea funcțională este influențată de următorii factori: tipul SMI, valorile componentelor impedanței simulate, caracterul și valoarea impedanței externe echivalente și caracteristicile AO.

Pentru a estima condițiile de stabilitate în circuite, în conformitate cu criteriul Nyquist, este necesar a determina factorul de câștig βA al circuitului și a-l examina în vecinătatea punctului critic $(-1, +j0)$ în coordonatele $\text{Re}(\beta A)$, $\text{Im}(\beta A)$. Condiția stabilității absolute a circuitului poate fi definită astfel:

$$\text{Re}(\beta A) > -1, \quad (7)$$

unde: β – factorul de reacție; A – factorul de câștig a elementului de transmisie directă.

La estimarea condiției de stabilitate a SMI se utilizează modelul reprezentat în figura 4. Pentru modelarea condiției sarcinii externe, la intrarea simulatorului este conectată impedanța echivalentă a circuitului extern Z_e [13]. Pentru determinarea funcției de transfer, se întrerupe circuitul de reacție între ieșirea amplificatorului diferențial AD2 și intrarea neinversoare a amplificatorului A.

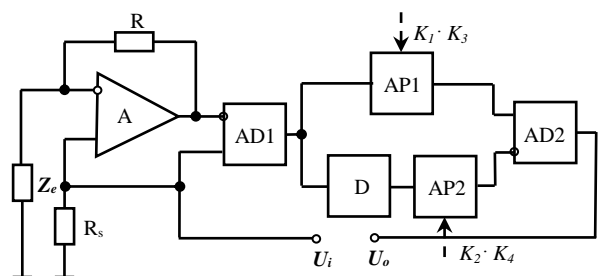


Fig. 4. Modelul SMI la analiza stabilității

Funcția de transfer H a circuitului se determină utilizând metoda grafului de fluentă [8]. Condiția de stabilitate absolută a circuitului obținută va fi:

$$R_i R_e + X_i X_e > -(R_e^2 + X_e^2). \quad (8)$$

În cazul în care impedanța echivalentă a circuitului extern are caracter activ, atunci condiția (8) se simplifică:

$$R_e > |R_{i_{max}}|. \quad (9)$$

După cum urmează din relația (9), la măsurarea impedanței de orice caracter, SMI își menține stabilitatea funcțională doar dacă este utilizat în circuite cu rezonanță serie, alimentate de la un generator stabil de curent cu rezistență internă cu caracter pur activ.

În **capitolul trei „Eroarea simulatorul metrologic de impedanță”** sunt determinate relațiile de estimare a erorii sistematice a componentelor impedanței reproduse. Pentru determinarea componentei sistematice a erorii cauzată de factorii de neidealitate a elementelor din componența simulatorului se elaborează un model de determinare a erorii (figura 5) [14].

Expresia acestei erorii se deduce prin intermediul grafurilor de fluentă. Eroarea impedanței reproduse de SMI este o mărime complexă reprezentată în coordonate carteziene. Întrucât pentru impedanța reprodusă, partea reală prezintă o rezistență, iar partea imaginară o reactanță, acest lucru este valabil și pentru eroarea impedanței reproduse:

$$\delta(R_i)_{AO} = Re(\delta_{z_i}) = \frac{(K - \chi)\chi - \varepsilon^2}{\chi^2 + \varepsilon^2}; \quad (10)$$

$$\delta(X_i)_{AO} = Im(\delta_{z_i}) = -\frac{K\varepsilon}{\chi^2 + \varepsilon^2}. \quad (11)$$

unde:

$$\begin{aligned} \chi &= \alpha - \alpha\beta\omega_n K + K + K_R(\alpha K - I) - K_X(K\alpha\beta - K\omega_n); \\ \varepsilon &= \omega_n K\alpha + \alpha\beta + K_R(\alpha\beta K - \omega_n K) + K_X(\alpha K - I); \\ \alpha &= \frac{R}{R_{MC}}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\beta = \omega\tau_{MC}.$$

Conform relațiilor (10)-(12), erorile componentelor impedanței reproduse sunt determinate de tipul AO utilizat, de frecvența semnalului de măsurare, de valoarea coeficientului de transfer al convertorului curent-tensiune și de valorile componentelor reproduse. De aceea, pentru estimarea valorilor acestor erori se consideră cazuri particulare.

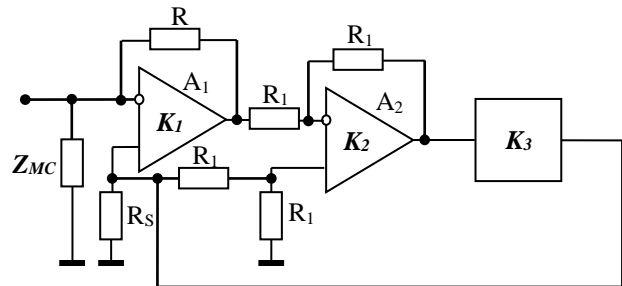


Fig. 5. Modelul SMI pentru calcularea erorilor

Pentru determinarea componentei sistematice a erorii cauzată de toleranța elementelor pasive se analizează influența valorii toleranței fiecărui element pasiv asupra valorii coeficientului de transfer al fiecărui bloc din componența simulatorului. Relația acestei erori se deduce utilizând legile de propagare a erorilor în circuitele cu mai multe etaje. Relația pentru estimarea valorii erorii componentei active a impedanței reproduce în funcție de toleranța componentelor pasive este:

$$\delta(R_i)_{R=R\pm\varepsilon R} = \pm \left\{ \left(\varepsilon \frac{\varepsilon^2 - 7\varepsilon + 5}{\varepsilon^2 - 6\varepsilon + 4} \right)^2 + \left[\left(\varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \cdot \frac{q-1}{2q-1} \right]^2 + \left(\varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^2 + \right. \\ \left. + \varepsilon^2 + \left(\varepsilon \frac{\varepsilon^2 - 7\varepsilon + 5}{\varepsilon^2 - 6\varepsilon + 4} \right)^2 + \left[\left(\varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \cdot \frac{q-1}{2q-1} \right]^2 + \left(\varepsilon \frac{\varepsilon^2 - 7\varepsilon + 5}{\varepsilon^2 - 6\varepsilon + 4} + \varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (13)$$

iar a componentei reactive:

$$\delta(X_i)_{R=R\pm\varepsilon R, C=C\pm\sigma C} = \pm \left\{ 3 \cdot \left(\varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^2 + 2 \cdot \left[\left(\varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \cdot \frac{q-1}{2q-1} \right]^2 + 2 \cdot \left[\frac{\varepsilon\sqrt{2}}{2} + \frac{\varepsilon\sqrt{2}}{2(1\pm\varepsilon)} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2\varepsilon\sqrt{2\varepsilon^2 \pm 4\varepsilon + 4}}{2\varepsilon^2 \pm 4\varepsilon + 4} + \frac{2\sigma\sqrt{2\sigma^2 \pm 4\sigma + 4}}{2\sigma^2 \pm 4\sigma + 4} \right]^2 + \varepsilon^2 + \left(\varepsilon \frac{\varepsilon^2 - 7\varepsilon + 5}{\varepsilon^2 - 6\varepsilon + 4} + \varepsilon + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (14)$$

Relațiile (13) și (14) au fost obținute considerându-se că toate rezistențele au aceeași toleranță ε , condensatorul C_1 are toleranța de fabricație σ , iar pentru asigurarea unui defazaj de 90° se respectă condiția $\omega C_1 R_{l2} = 1$ (figura 3).

De asemenea, se determină și valoarea erorii componentelor impedanței reproduse cauzată de instabilitatea frecvenței semnalului de măsurare și variația temperaturii. Astfel, relația pentru valoarea erorii componentei active a impedanței reproduse în funcție de variația temperaturii este:

$$\delta(R_i)_{T=T\pm\Delta T} = \pm \left\{ \left[\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \frac{\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 - 7 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 5}{\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 - 6 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 4} \right]^2 + \left[\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right) \cdot \frac{q-1}{2q-1} \right]^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right)^2 + \left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 + \left[\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \frac{\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 - 7 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 5}{\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 - 6 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 4} \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right) \cdot \frac{q-1}{2q-1} \right]^2 + \left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \frac{CTR \cdot \Delta T^2}{10^6} - 7 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 5 + \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

iar pentru componenta reactivă:

$$\begin{aligned}
\delta(X_i)_{T=T\pm\Delta T} = & \pm \left\{ 3 \cdot \left[\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right]^2 + 2 \cdot \left[\left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right) \cdot \frac{q-1}{2q-1} \right]^2 + \right. \\
& + 2 \cdot \left[\frac{\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \sqrt{2}}{2} + \frac{\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \sqrt{2}}{2 \left(1 \pm \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)} + \frac{2 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \sqrt{2 \left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 \pm 4 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 4}}{2 \frac{CTR \cdot \Delta T^2}{10^6} \pm 4 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 4} + \right. \\
& + \left. \left. \frac{2 \frac{CTC \cdot \Delta T}{10^6} \sqrt{2 \left(\frac{CTC \cdot \Delta T}{10^6} \right)^2 \pm 4 \frac{CTC \cdot \Delta T}{10^6} + 4}}{2 \frac{CTC \cdot \Delta T^2}{10^6} \pm 4 \frac{CTC \cdot \Delta T}{10^6} + 4} \right]^2 + \frac{CTR \cdot \Delta T^2}{10^6} + \left(\frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \frac{CTR \cdot \Delta T^2}{10^6} - 7 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 5 \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} \frac{CTR \cdot \Delta T^2}{10^6} - 6 \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + 4 \right) + \right. \\
& \left. \left. + \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6} + \frac{CTR \cdot \Delta T}{1 - \frac{CTR \cdot \Delta T}{10^6}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \tag{16}
\end{aligned}$$

unde: CTR, CTC – coeficientul de temperatură al tuturor rezistoarelor, respectiv al condensatorului; ΔT – abaterea temperaturii de la valoarea nominală.

Eroarea componentei reactive a impedanței reproduse în funcție de instabilitatea frecvenței semnalului de măsurare se determină cu ajutorul relației:

$$|\delta(X_i)|_{\omega=\omega+\Delta\omega} = \frac{2\Delta\sqrt{2\Delta^2 \pm 4\Delta + 4}}{2\Delta^2 \pm 4\Delta + 4}. \tag{17}$$

unde: Δ – abaterea valorii frecvenței semnalului de măsurare de la valoarea nominală.

Considerând expresiile (10), (13) și (15), eroarea totală a componentei active se determină prin relația:

$$\delta(R_i) = \sqrt{[\delta(R_i)_{AO}]^2 + [\delta(R_i)_{R=R\pm\epsilon R}]^2 + [\delta(R_i)_{T=T\pm\Delta T}]^2}, \tag{18}$$

iar conform relațiilor (11), (14), (16) și (17), eroarea totală a componentei reactive se determină prin relația:

$$\delta(X_i) = \sqrt{[\delta(X_i)_{AO}]^2 + [\delta(X_i)_{R=R\pm\epsilon R, C=C\pm\sigma C}]^2 + [\delta(X_i)_{\omega=\omega+\Delta\omega}]^2 + [\delta(X_i)_{T=T\pm\Delta T}]^2} \tag{19}$$

Pentru a verifica corectitudinea practică a relațiilor teoretice (18) și (19), în laborator au fost determinate valorile practice ale erorilor componentelor impedanței reproduse de SMI. Valorile erorilor obținute în rezultatul prelucrării rezultatelor măsurărilor în laborator sunt mai mari comparativ cu valorile teoretice, însă se încadrează în același ordin. În tabelul 1 și 2 sunt prezentate valorile erorii componentelor activă (Tabelul 1) și reactivă (Tabelul 2) obținute teoretic și valorile erorilor determinate la măsurările directe în laborator considerându-se cazurile

particulare. Măsurările la frecvența de 1 MHz au fost efectuate cu ajutorul măsurătorului E7-12, iar cele de la frecvențele 0,1 kHz și 1 kHz cu ajutorul punții E7-11.

Tabelul 1. Valori teoretice și calculate practic ale erorii componente active

Condițiile cazurilor particulare de măsurare	$R_i = 5 \text{ k}\Omega, \epsilon_R = 0,1\%$		$f_S = 1 \text{ MHz}, R_i = 5 \text{ k}\Omega$	
	$f_S = 100 \text{ Hz}$	$f_S = 1 \text{ kHz}$	$\epsilon_R = 0,1\%$	$\epsilon_R = 0,5\%$
Valoarea teoretică, $\delta_R \%$	0,434	0,435	0,656	2,220
Valoarea obținută în rezultatul prelucrării măsurărilor, $\delta_R \%$	0,687	0,752	0,865	2,753

Tabelul 2. Valori teoretice și calculate practic ale erorii componente reactive

Condițiile cazurilor particulare de măsurare	$X_i = 5 \text{ k}\Omega, f_S = 1 \text{ MHz}$		$f_S = 1 \text{ kHz}, X_i = 5 \text{ k}\Omega, \sigma_C = 1\%$
	$\sigma_C = 1\%$	$\sigma_C = 2\%$	
Valoarea teoretică, $\delta_X \%$	1,847	3,295	1,847
Valoarea obținută în rezultatul prelucrării măsurărilor, $\delta_X \%$	2,256	4,324	2,385

În lucrare mai este analizată și dependența erorii defazajului de 90° de factorii de eroare specificați mai sus.

În anexa tezei sunt prezentate toate graficele dependențelor valorilor erorii componentelor impedanței reproduse de factorii de eroare enumerați mai sus pentru diferite cazuri particulare.

În **capitolul patru „Circuite metrologice cu rezonanță simulată”** este analizat funcțional circuitul rezonant de tip serie pentru măsurarea impedanței (CRM). CRM se alimentează cu un curent stabil I_G de la generatorul G conectat în serie cu impedanța măsurată Z_X și cu un SMI [15,16,17]. SMI reproduce impedanța de referință Z_E , având capacitatea de a regla componenta activă (R_E) și reactivă (X_E) a acesteia. Starea de echilibru în circuitul rezonant de tip serie se stabilește prin intermediul funcției de echilibru:

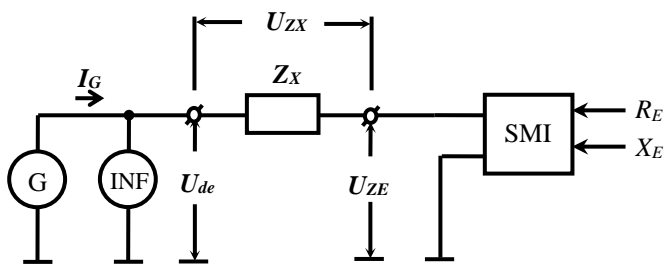


Fig. 6. Circuitul rezonant de tip serie

$$U_{de} = U_{ZX} + U_{ZE} = I_G (Z_X + Z_E) \quad (20)$$

Funcționarea CRM de tip serie în regim de echilibrare parțială presupune echilibrarea acestuia doar după una din componentele impedanțelor. În funcție de componenta după care se realizează procesul de echilibrare, CRM poate fi considerat în regim de echilibrare parțială după componenta activă sau în regim de echilibrare parțială după componenta reactivă.

Conform [1], în cazul echilibrării parțiale a CRM pot fi utilizate două tipuri ale funcției de echilibrare: în extremum și în cuadratură. În regim de echilibrare parțială după componenta activă a CRM prin intermediul funcției în extremum se va respecta condiția:

$$R_X + R_E = 0, \quad (21)$$

iar prin intermediul funcției în cuadratură – condiția:

$$\arg(U_{de}) - \arg(I_G) = 90^\circ. \quad (22)$$

Conform (22), momentul de echilibrare parțială după componenta activă în CRM de tip serie îi corespunde momentul apariției unui defazaj de 90° între tensiunea de dezechilibru U_{de} și curentul prin CRM I_G . În calitate de semnal de referință U_{ref} se utilizează un semnal produs de SMI, a cărui fază coincide cu faza căderii de tensiune pe componenta reactivă a impedanței de referință, adică un semnal defazat la 90° față de curentul I_G . Astfel, în procesul de echilibrare, valoarea componentei active a impedanței reproduse se reglează până la apariția unui defazaj de 0° sau 180° între semnalul de referință U_{ref} și semnalul de dezechilibru U_{de} (figura 7) [17,18]. La atingerea acestei stări, amplitudinea semnalului de dezechilibru are valoare minimă, iar circuitul este echilibrat după componenta activă.

În regim de echilibrare parțială după componenta reactivă, echilibrarea are loc prin reglarea doar a componentei reactive a impedanței reproduse. În acest caz, în calitate de semnal de referință U_{ref} se utilizează un semnal produs de SMI a cărui fază coincide cu faza curentului prin CRM. În procesul de echilibrare, valoarea componentei reactive a impedanței reproduse se reglează până la apariția unui defazaj de 0° sau 180° între semnalul de dezechilibru și semnalul de referință [17,18].

În regimul de echilibrare totală a CRM, procesul de echilibrare a circuitului se realizează după ambele componente ale impedanței. În acest caz, atât componenta activă, cât și cea reactivă reprezintă parametri informaționali.

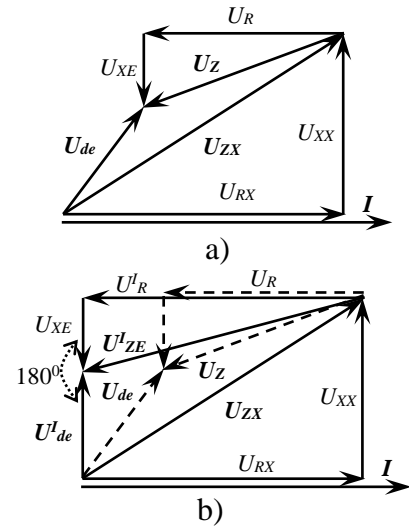


Fig. 7. Echilibrarea parțială a CRM de tip serie după componenta activă: a) etapa de dezechilibru, b) etapa de echilibru

În regim de echilibrare totală, în calitate de semnal de referință U_{ref} se utilizează un semnal produs de SMI a cărui fază coincide cu faza căderii de tensiune pe componenta reactivă a impedanței de referință. Procesul de echilibrare constă din două etape independente (figura 8): în prima etapă (figura 8 b) se reglează componenta activă a impedanței reproduse (R_E) până la obținerea unui defazaj de 0^0 sau 180^0 între semnalul de dezechilibru U_{de} și semnalul de referință U_{de} ; în etapa a doua (figura 8 c) se reglează componenta reactivă a impedanței reproduse (X_E) până la trecerea defazajului respectiv din 0^0 în 180^0 sau din 180^0 în 0^0 . Acest moment coincide cu momentul obținerii valorii nule a semnalului de dezechilibru U_{de} [17,18].

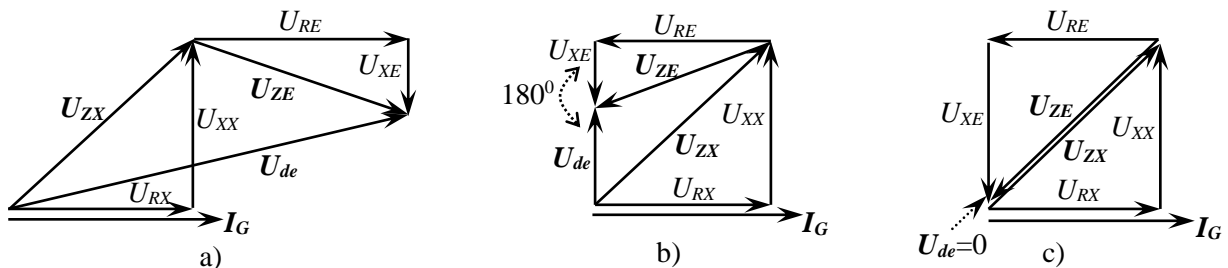


Fig. 8. Echilibrarea totală a CRM de tip serie: a) etapa de dezechilibru; b) etapa de echilibrare după componenta activă; c) etapa de echilibrare după componenta reactivă

La echilibrarea circuitului tensiunea U_{de} este:

$$U_{de} = U_{ZX} + U_{ZE} = I_G (Z_X + Z_E) = 0. \quad (23)$$

Din relația (23) rezultă:

$$I_G [(R_X + jX_X) + (R_E + jX_E)] = 0. \quad (24)$$

Soluțiile ecuației (24) sunt:

$$R_X = -R_E, \quad X_X = -X_E. \quad (25)$$

În teză, rezultatele teoretice referitoare la funcționalitatea circuitului metrologic cu rezonanță simulată se verifică pe baza rezultatelor obținute la modelarea asistată de calculator a acestora [19,20].

În **capitolul cinci „Impedanțmetrul în coordonate carteziene”** este elaborat și analizat funcțional impedanțmetrul în coordonate carteziene [21-25]. Pentru acest dispozitiv se propune o

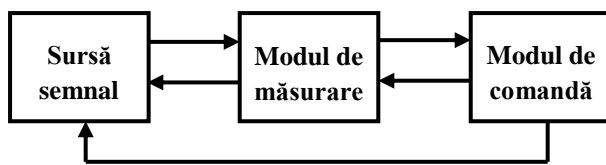


Fig. 9. Schema bloc a impedanțmetrului

structură ce constă din trei module [17,26]: sursa de semnal (SS), modulul de măsurare (MM) și modulul de comandă (MC) (figura 9). Se elaborează schema-bloc a sursei de semnal ce respectă cerințele referitoare la

valoarea stabilă și cunoscută a frecvenței semnalului și la reglarea automată a nivelului semnalului în corespundere cu valoarea mărimii măsurate (figura 10) [27].

Microcontrolerul asigură formarea unui semnal cu modulație a impulsurilor în durată (MID) conform legii semnalului sinusoidal. Stabilitatea înaltă a frecvenței semnalului MID este asigurată de elementul de cuarț. Prin intermediul magistralei „*Fixare frecvență*” se asigură un coeficient de multiplicare corespunzător frecvenței de tact și în consecință se modifică frecvența semnalului MID. Cu ajutorul MC se va asigura fixarea frecvenței semnalului de măsurare la una din valorile dorite $f_1 \div f_n$. Filtrele $F_1 \div F_n$ sunt acordate respectiv la frecvențele corespunzătoare $f_1 \div f_n$ și asigură formarea semnalului sinusoidal din semnalul MID.

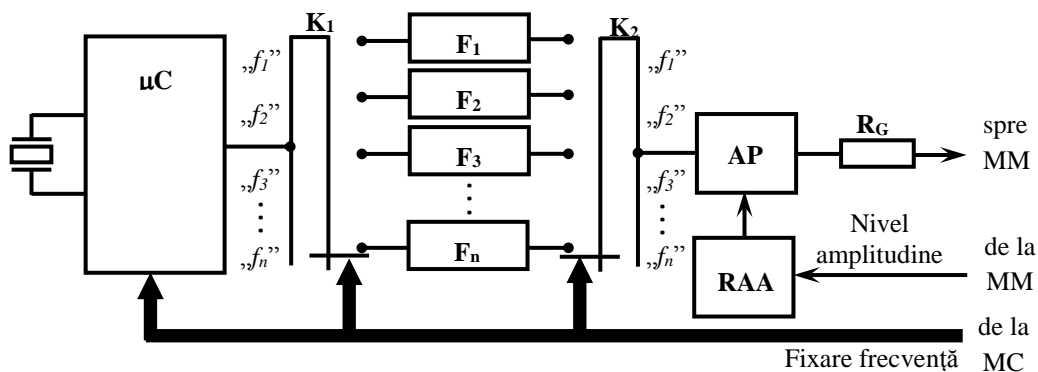


Fig. 10. Schema-bloc a sursei de semnal

Pentru asigurarea unui nivel corespunzător al semnalului de măsurare, SS dispune de un bloc de reglare automată a amplitudinii (RAA) care, în funcție de nivelul semnalului de la MM, asigură reglarea coeficientului de transfer al amplificatorului programabil AP.

Modulul de măsurare (figura 11) al impedanțmetrului este bazat pe un CRM de tip serie cu un SMI în componența sa [27]. Se propune circuitul simulatorului metrologic de impedanță care permite controlul digital al tipului și caracterului mărimii de referință reproduse [28].

Formarea componentei reactive în cadrul simulatorului de impedanță se realizează cu ajutorul blocului de defazoare la 90^0 (BD 90^0) [28, 29]. Acest bloc constă din n defazoare, fiecare dintre ele asigurând un defazaj de 90^0 sau -90^0 (în funcție de semnalul prin magistrala *Fixare caracter* X_E) în funcție de valorile frecvenței semnalului de măsurare $f_1 \div f_n$.

Semnalul de referință este format de SMI și reprezintă tensiunea de la ieșirea BD 90^0 . Semnalul de dezechilibru se citește de la intrarea MM, iar pentru a asigura o sensibilitate sporită la citirea acestuia, acest semnal se amplifică cu ajutorul unui amplificator cu limitare A.

Procesul de determinare a defazajului dintre aceste semnale, precum și procesul de echilibrare al circuitului de măsurare se efectuează cu ajutorul MC. Acesta asigură dirijarea funcționalității întregului dispozitiv prin intermediul următoarelor funcții: asigurarea interfeței cu utilizatorul; fixarea frecvenței semnalului SS; echilibrarea după componenta activă a CMR din

structura MM; echilibrarea după componenta reactivă a CMR din structura MM; prelucrarea rezultatelor după echilibrarea CMR și transmiterea rezultatelor la interfața dispozitivului.

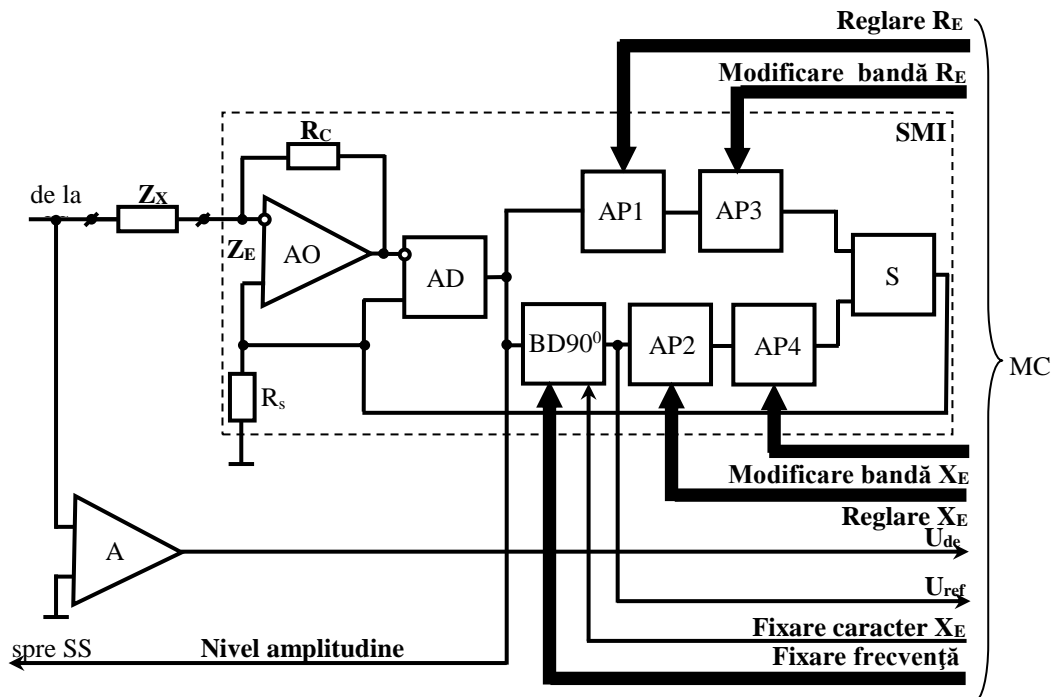


Fig. 11. Schema-bloc a modului de măsurare

Schema-bloc a MC este reprezentată în figura 12 [27,28]. Elementul de bază al MC, care reprezintă și „creierul” impedanțmetrului, este blocul de comandă (BC) realizat pe bază de microcontroler. MC mai conține două comparatoare, C_1 și C_2 , pentru conversia semnalelor sinusoidale în serii de impulsuri dreptunghiulare, un bistabil de tip D dinamic (BDD) care formează semnalul (CE) de fixare a momentului de rezonanță în procesul de echilibrare, precum și un microcontroler USB (μC USB) ce asigură interfața dintre BC și PC.

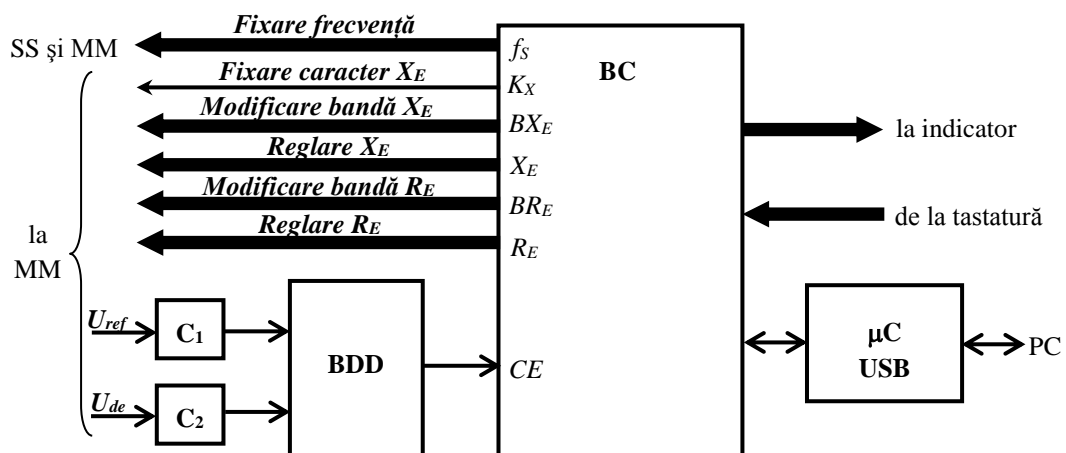


Fig. 12. Schema-bloc a modului de comandă

Algoritmul de funcționare al acestui bloc este reprezentat în figura 13. Odată cu conectarea alimentării, BC determină tipul interfeței cu operatorul. Inițial se verifică conexiunea la PC prin intermediul portului USB. Dacă impedanțmetrul nu este conectat la PC, BC activează porturile la care sunt conectate indicatorul și tastatura. După fixarea interfeței cu utilizatorul, BC cere utilizatorului fixarea valorii frecvenței semnalului de măsurare. Această valoare a frecvenței se codifică și se transmite blocurilor corespunzătoare din SS și MM. În funcție de valoarea fixată de operator, BC va transmite prin magistrala „**Fixarea frecvenței**” codul digital f_s . Totodată această valoare a frecvenței este memorată, apoi utilizată de BC în procesul de prelucrare a rezultatelor.

După fixarea valorii frecvenței semnalului de măsurare, BC începe procesul de echilibrare a CMR. Conform [17,27] procesul de echilibrare se efectuează în două etape: echilibrarea după componenta activă și echilibrarea după componenta reactivă. Pentru asigurarea procesului de echilibrare după componenta activă, BC prin intermediul magistralelor „**Reglare R_E** ” și „**Modificare bandă R_E** ” va dirija valoarea componentei active a impedanței reproduse până la schimbarea valorii semnalului CE . La finisarea procesului de echilibrare după componenta activă, BC inițiază procesul de echilibrare după componenta reactivă. Pentru aceasta, BC dirijează valoarea componentei reactive a impedanței de referință prin intermediul magistralelor „**Reglare X_E** ”, „**Modificare bandă X_E** ” și „**Fixare caracter X_E** ”. Dacă s-a asigurat echilibrarea CMR, atunci BC

inițiază procedura de prelucrare a rezultatelor și afișarea lor. În cazul în care interfața cu operatorul este realizată prin intermediul PC-ului, atunci prelucrarea rezultatelor poate fi efectuată de către calculator prin intermediul unor componente software special elaborate. În acest caz, BC transmite PC-ului valorile codurilor R_E , BR_E , X_E , BX_E , K_X și f_s . Dacă rezultatele vor fi afișate pe indicatorul impedanțmetrului, atunci BC va asigura și prelucrarea rezultatelor. Impedanțmetrul va afișa pe ecran valorile următoarelor mărimi: rezistența R_X , reactanța X_X , inductanța L_X și factorul de calitate Q_X dacă $K_X=0$ sau rezistența R_X , reactanța X_X , capacitatea C_X și tangenta unchiului de pierderi $tg\delta_X$ dacă $K_X=1$.

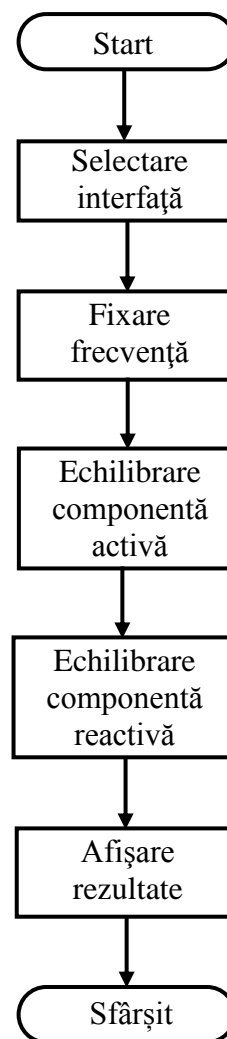


Fig. 13. Algoritmul de funcționare a blocului de comandă

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Prin lucrarea de față autorul și-a propus să aducă partea sa de contribuție la cercetările referitoare la elaborarea metodelor și dispozitivelor de măsurare cu precizie înaltă a componentelor impedanței pe baza efectului rezonanței simulate. Totodată în baza rezultatelor obținute, autorul propune un set de recomandări referitor la ulterioare cercetări și la îmbunătățirea parametrilor metrologici ai dispozitivului elaborat.

Principalele concluzii:

1. În rezultatul cercetărilor a fost demonstrat conceptul metodologic de aplicare a efectului rezonanței simulate pentru măsurarea cu precizie înaltă prin metoda comparării simultane cu măsura a componentelor impedanțelor de orice caracter în coordonate carteziane. Acest lucru este posibil datorită utilizării în calitate de elemente de referință a mărimilor electrice pasive simulate.

2. A fost elaborată structura simulatorului de impedanță în coordonate carteziane cu caracteristici avansate, care asigură reproducerea cu precizie înaltă a impedanței și cu posibilitatea reglării benzilor de valori și a valorilor componentelor acesteia. Acest simulator se mai caracterizează prin :

- posibilitatea reproducerii impedanțelor simulate de orice caracter al componentelor;
- reglarea independentă a componentelor impedanței simulate;
- lipsa elementelor reactive reglabile (condensatoare variabile, magazine de inductanță și capacitate etc.).

3. A fost demonstrată posibilitatea utilizării simulatoarelor metrologice de impedanță în calitate de elemente de referință de precizie înaltă în măsurătoarele de impedanță cu rezonanță simulată în coordonate carteziane.

4. La elaborarea structurii simulatorului de impedanță a fost utilizată metoda de sinteză și analiză funcțională bazată pe aplicarea grafurilor de fluentă. Cu ajutorul grafurilor de fluentă a fost perfecționată structura simulatorului prin excluderea buclelor de reacție inversă pozitivă.

5. A fost elaborat modelul matematic, obținut prin metoda grafurilor de fluentă, care asigură determinarea condițiilor de stabilitate a simulatorului metrologic de impedanță. Simulatorul de impedanță își menține stabilitatea funcțională doar dacă este utilizat în circuite cu rezonanță serie, alimentate de la un generator stabil de curent cu rezistență internă cu caracter pur activ .

6. A fost elaborat modelul matematic pentru determinarea valorilor componentelor erorii sistematice cauzate de factorii de neidealitate ai amplificatoarelor operaționale din componența

simulatoarelor, de toleranța elementelor pasive, de instabilitatea frecvenței semnalului de măsurare, precum și de variația temperaturii.

7. A fost analizat și modelat circuitul rezonant de măsurare de tip serie pe baza simulatoarelor de impedanță în coordonate carteziane cu caracteristici avansate, au fost identificate semnalele de referință și de dezechilibru în cadrul acestui circuit și au fost determinate condițiile de echilibrare în regim parțial și total.

8. Au fost elaborați algoritmi de măsurare a componentelor impedanței în cadrul circuitului rezonant de măsurare de tip serie, care conțin doar două operații de reglare a mărimii reproduse de către elementul de referință:

- reglarea componentei active a impedanței reproduse de simulatorul până la apariția unui defazaj de 180^0 sau 0^0 între semnalul de referință și cel de dezechilibru, moment ce corespunde valorii minime a amplitudinii semnalului de dezechilibru;
- reglarea componentei reactivă a impedanței reproduse până la trecerea defazajului respectiv din 0^0 în 180^0 sau din 180^0 în 0^0 . Acest moment coincide cu momentul obținerii valorii nule a semnalului de dezechilibru.

9. A fost elaborată structura impedanțmetrului cu rezonanță simulată în coordonate carteziane caracterizat prin universalitate și automatizarea procesului de măsurare

10. A fost descris principiul de funcționare al sursei de semnal din componența impedanțmetrului și specificate cerințele față de semnalul de măsurare.

11. A fost elaborată structura modulului de măsurare a impedanțmetrului pe baza circuitului rezonant de măsurare cu simulatorul de impedanță în componența sa.

12. A fost elaborată structura și algoritmul de funcționare a modulului de control ce permite automatizarea procesului de măsurare și prelucrarea datelor.

Recomandări de cercetare pentru viitor:

1. Extinderea cercetărilor în vederea elaborării măsurătoarelor de impedanță cu rezonanță simulată în coordonate polare care ar asigura măsurarea componentelor acestuia prin reglarea independentă a modulului și fazei impedanței reproduse.

2. Cercetarea posibilităților de îmbunătățire a caracteristicilor metrologice ale impedanțmetrului în coordonate carteziane prin substituirea amplificatoarelor operaționale din componența simulatorului de impedanță cu conveioare.

3. Elaborarea componentei software care ar permite comunicarea impedanțmetrului cu calculatorul personal, dirijarea procesului de măsurare prin intermediul acestuia, precum și afișarea și stocarea rezultatelor măsurărilor pe suport de memorie.

BIBLIOGRAFIE

1. Настас В. Ю. Методы и средства технологического измерения сопротивления резистивных элементов из изолированного провода. Диссерт. канд. техн. наук. Кишинев, 1988. 214 с.
2. Nastas V., Nicolaev P. Măsurarea impedanței prin metoda rezonanței simulate. Ghid de laborator, Chișinău, Editura "Tehnica-UTM", 2017, 46 p.
3. Brevet de invenție. 90Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00. Convertor de admitanță / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD), Cererea depusă 04.12.2008, BOPI nr. 9/2009.
4. Brevet de invenție. 195Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 06.05.2009, BOPI nr. 4/2010.
5. Brevet de invenție. 638Z, MD, G01R 27/02, G01R 35/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 11.09.2012, BOPI nr. 5/2013.
6. Brevet de invenție. 818Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 26.02.2014, BOPI nr. 9/2014.
7. Nastas V., Nicolaev P. Topological modelling of the metrological impedance simulators. In: Annals of the University of Craiova. Electrical Engineering series, 2009, nr 33, p. 154-158.
8. Nicolaev P. Analiza simulatoarelor metrologice de impedanță prin metoda grafurilor orientate. Proceedings of the 7th International Conference of Young Researchers, 2009, p. 83.
9. Brevet de invenție. 248Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00, H03B 29/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 07.07.2009, BOPI nr. 7/2010.
10. Nicolaev P. Optimizarea simulatorului de impedanță în coordonate carteziene. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2009, vol I, p. 109-110.
11. Carter B., Brown T. R. Handbook of operational amplifier applications. Dallas: Texas Instruments, 2001. 85 p.
12. Nastas V., Nicolaev P. Topological modelling of the metrological impedance simulators. Proceedings of the 7th International Conference of Electromechanical and Power Systems, 2009, Vol I, p. 213-216.
13. Nastas V. Metrological simulators of electrical passive quantities with algorithmic structure. In: Moldavian Journal of the Physical Sciences, 2010, vol 9, nr. 1, p. 85-102.
14. Nastas V., Nicolaev P. Eroarea sistematică a simulatorului metrologic de impedanță. În: Meridian ingineresc, 2013, nr 3, p. 37-42.

15. Nicolaev P. Modelarea simulatoarelor de impedanță în programul Orcad. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2007, vol I, p. 59-60.

16. Nastas V., Nicolaev P. Măsurarea admitanței în circuite cu rezonanță simulată paralelă. Proceedings of the 3rd International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics, 2010, Vol. II, p. 258-263.

17. Nicolaev P. Meters of impedance with simulated resonance. Proceeding of the 5th International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2015, p. 374-378

18. Nicolaev P. Modelarea topologică a simulatoarelor de impedanță în coordonate carteziane. Proceeding of the 3rd International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2010, vol. II, p. 264-267.

19. Nastas V., Nicolaev P. Analiza simulatoarelor de impedanță în coordonate carteziane în programul Multisim. Proceedings of the 2nd International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics, 2008, Vol II, p. 211-216.

20. Nicolaev P. Modelarea simulatorului de impedanțe flotante în programul Multisim. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2008, vol I, p. 51-52.

21. Brevet de invenție. 279Z, MD, G01R 27/02. Impedanțmetru / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 26.03.2010, BOPI nr. 9/2010.

22. Brevet de invenție. 351Z, MD, G01R 27/02. Admitanțmetru / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 05.10.2010, BOPI nr. 3/2011.

23. Brevet de invenție. 629Z, MD, G01R 27/02. Ohmmetru / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 14.12.2012, BOPI nr. 4/2013.

24. Brevet de invenție. 639Z, MD, G01R 27/02. Impedanțmetru / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 24.10.2012, BOPI nr. 5/2013.

25. Brevet de invenție. 873Z, MD, G01R 27/02. Impedanțmetru / Nastas Vitalie, Nicolaev Pavel (MD). Cererea depusă 04.09.2014, BOPI nr. 1/2015.

26. Nastas V., Nicolaev P. Impedancemeter with simulated resonance. Proceedings of the 6nd International Conference on Electrical and Power Engineering, 2010, Vol. II, p. 297-300.

27. Nicolaev P. Impedance meter with simulated resonance. În. Meridian ingineresc, 2016, nr 2, p. 76-82.

28. Nicolaev P., Impedance meter in Cartesian coordinates. Proceeding of the 6th International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2018, p. 92-97.

29. Nicolaev P. Defazor de 90⁰ independent de frecvență. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2009, vol I, p. 111-112.

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE LA TEMA TEZEI

I. Articole în reviste științifice

1. V. Nastas, **P. Nicolaev**. Topological modelling of the metrological impedance simulators. Annals of the University of Craiova. Electrical Engineering series, 2009, nr 33, p. 154-158, ISSN 1842-4805, Categoria B
2. V. Nastas, **P. Nicolaev**. Eroarea sistematică a simulatorului metrologic de impedanță. Meridian ingineresc, 2013, nr 3, p. 37-42. ISSN 1683-853X categoria C.
3. **P. Nicolaev** Impedance meter with simulated resonance. Meridian ingineresc, 2016, nr 2, p. 76-82. ISSN 1683-853X categoria C.

II. Articole în culegeri științifice

4. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Analiza simulatoarelor de impedanță în coordonate carteziane în programul Multisim. Proceedings of the 2nd International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics, 2008, Vol II, p. 211-216. ISBN 978-975-45-377-6.
5. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Măsurarea impedanței în coordonate carteziane prin metoda rezonanței simulate. Proceedings of the 6nd International Conference Microelectronics and Computer Science, 2009, p. 65-68. ISBN 978-9975-45-329-5
6. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Topological modelling of the metrological impedance simulators. Proceedings of the 7th International Conference of Electromechanical and Power Systems, 2009, Vol I, p. 213-216. ISBN 978-606-520-623-6
7. **P. Nicolaev**, Analiza simulatoarelor metrologice de impedanță prin metoda grafurilor orientate. Proceedings of the 7th International Conference of Young Researchers, 2009, p. 83. ISBN 978-9975-70-901-9
8. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Impedancemeter with simulated resonance. Proceedings of the 6nd International Conference on Electrical and Power Engineering, 2010, Vol. II, p. 297-300. ISBN 978-606-13-0071-6
9. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Măsurarea admitanței în circuite cu rezonanță simulată paralelă. Proceedings of the 3rd International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics, 2010, Vol. II, p. 258-263. ISBN 978-975-45-377-6
10. **P. Nicolaev**, Modelarea topologică a simulatoarelor de impedanță în coordonate carteziane. Proceeding of the 3rd International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2010, vol. II, p. 264-267. ISBN 978-975-45-377-6
11. **P. Nicolaev**, Meters of impedance with simulated resonance. Proceeding of the 5th International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2015, p. 374-378. ISBN 978-975-45-377-6
12. **P. Nicolaev**, Impedance meter in Cartesian coordinates. Proceeding of the 6th International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2018, p. 92-97. ISBN 978-975-45-377-6

13. V. Nastas, **P. Nicolaev**, A. Kazak, Utilizarea metodei rezonanței simulate la măsurarea impedanței lichidelor. Proceeding of the 6th International Conference Telecommunications, Electronics and Informatics 2018, p. 480-483. ISBN 978-975-45-377-6
14. **P. Nicolaev**, Modelarea simulatoarelor de impedanță în programul Orcad. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2007, vol I, p. 59-60.
15. **P. Nicolaev**, Modelarea simulatorului de impedanțe flotante în programul Multisim. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2008, vol I, p. 51-52.
16. **P. Nicolaev**, Defazor de 90⁰ independent de frecvență. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2009, vol I, p. 111-112.
17. **P. Nicolaev**, Optimizarea simulatorului de impedanță în coordonate carteziane. În: culegere de lucrări științifice la Conferința Tehnico-Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 2009, vol I, p. 109-110.

III. Brevete de invenții

18. Brevet de invenție. 90Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00. Convertor de admitanță / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 04.12.2008, BOPI nr. 9/2009.
19. Brevet de invenție. 195Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 06.05.2009, BOPI nr. 4/2010.
20. Brevet de invenție. 248Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00, H03B 29/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 07.07.2009, BOPI nr. 7/2010.
21. Brevet de invenție. 279Z, MD, G01R 27/02. Impedanțmetru / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 26.03.2010, BOPI nr. 9/2010.
22. Brevet de invenție. 351Z, MD, G01R 27/02. Admitanțmetru / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 05.10.2010, BOPI nr. 3/2011.
23. Brevet de invenție. 629Z, MD, G01R 27/02. Ohmmetru / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 14.12.2012, BOPI nr. 4/2013.
24. Brevet de invenție. 638Z, MD, G01R 27/02, G01R 35/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 11.09.2012, BOPI nr. 5/2013.
25. Brevet de invenție. 639Z, MD, G01R 27/02. Impedanțmetru / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 24.10.2012, BOPI nr. 5/2013.
26. Brevet de invenție. 818Z, MD, G01R 27/02, H03H 11/46, G01R 35/00. Convertor de impedanță / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 26.02.2014, BOPI nr. 9/2014.
27. Brevet de invenție. 873Z, MD, G01R 27/02. Impedanțmetru / Nastas Vitalie, **Nicolaev Pavel** (MD). Cererea depusă 04.09.2014, BOPI nr. 1/2015.

IV. Materiale la saloanele de invenții

28. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Metode și aparataj pentru măsurarea impedanței. În catalogul Expoziției internaționale specializată INFOINVENT 2009, Chișinău: Bons Offices, 2009. p. 66.
29. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Aparataj pentru măsurarea impedanței prin metoda rezonanței *simulate*. În: Catalogul Salonul internațional de invenție PROINVENT ediția a VIII-a 2010, Cluj-Napoca: Utpress, 2010. p 321.
30. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Devices for the impedance measurement by method of simulated resonance. In: Catalog of the European exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2010, Iași, Tehnopress, 2010, pp 94
31. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Technics for measurement the impedance components. In: Catalog of the European exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2011, Iași: Tehnopress, p. 88-89
32. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Tehnici de măsurare a componentelor impedanței. În catalogul Expoziției internaționale specializată INFOINVENT 2011, Chișinău, 2011, p. 79
33. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Tehnici de măsurare a componentelor impedanței. Catalog, Salonul internațional de invenție PROINVENT ediția a IX-a 2011, Cluj-Napoca, Utpress, 2011
34. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Cartesian and polar coordinates meters of impedance. In: Catalog of the European exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2012, Iași, p. 102.
35. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Methods and devices with simulated resonance for impedance measurement. In: Catalog of the European exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2013, Iași, Editura Universității Al. Ioan Cuza, 2013, pp 71.
36. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Metode și dispozitive cu rezonanță simulată pentru măsurarea impedanței. În catalogul Salonului internațional de invenție PROINVENT ediția a XI-a 2013, Cluj-Napoca: Utpress, 2013.
37. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Metodologie de măsurare a impedanței pe baza efectului rezonanței simulate. În catalogul Expoziției internaționale specializată INFOINVENT 2013, Chișinău, p. 79-80.
38. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Măsurătoare de admitanță și impedanță cu rezonanță simulată, În catalogul Salonului internațional de invenție PROINVENT ediția a XII-a 2014, Cluj-Napoca: Utpress, 2014.
39. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Măsurătoare de admitanță și impedanță cu rezonanță simulată, In: Catalog of the European exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2014, Iași, Editura Universității Al. Ioan Cuza, 2014
40. V. Nastas, **P. Nicolaev**, Impedance measurement methodology based on simulated resonance effect, Exhibition of innovations, prototypes and student business plans INOVA-2014, Osijek, Croația
41. V. Nastas, V. Dorogan, **P. Nicolaev**, S. Zaporogan, E. Munteanu. Metodă și dispozitive pentru măsurarea impedanței produselor lichide, În catalogul Expoziției internaționale specializată INFOINVENT 2015, p. 82-83.

ADNOTARE

**la teza „Măsurătoare de impedanță cu rezonanță simulată în coordonate carteziane”,
prezentată de către Pavel Nicolaev pentru conferirea titlului de doctor în tehnică**

Teza a fost elaborată la Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, fiind scrisă în limba română și conține 120 pagini, 70 figuri, 8 tabele și 173 titluri bibliografice. Structura tezei include: introducere, 5 capitole, concluzii și 6 anexe. Anexele conțin 19 figuri și 19 tabele.

Teza este consacrată cercetării posibilităților de utilizare a efectului rezonanței simulate la măsurarea impedanțelor.

Scopul lucrării constă în cercetarea și elaborarea unor mijloace de măsurare a impedanțelor pe baza efectului rezonanței simulate, care se caracterizează prin precizie înaltă, universalitate în utilizare, simplitate în construcție și în aplicarea practică.

Noutatea științifică a lucrării constă în analiza principiilor generale de aplicare a metodei rezonanței simulate la măsurarea impedanței; sinteza și analiza simulatorului metrologic de impedanță în coordonate carteziane cu caracteristici avansate; în elaborarea circuitului de măsurare a impedanțelor pe baza efectului rezonanței simulate în coordonate carteziane, în elaborarea algoritmilor de echilibrare a acestui circuit, precum și a impedanțmetrului în coordonate carteziane.

Semnificația teoretică constă în analiza principiilor de aplicare a metodei rezonanței simulate pentru măsurarea impedanțelor, în aplicarea metodei grafurilor de fluentă la sinteza și analiza simulatorului metrologic de impedanță, în elaborarea și analiza structurii și algoritmului de funcționare a impedanțmetrului cu rezonanță simulată în coordonate carteziane.

Valoarea aplicativă a rezultatelor. În baza rezultatelor cercetărilor a fost elaborată structura impedanțmetrului cu rezonanță simulată pentru măsurarea cu precizie înaltă a impedanței în coordonate carteziane.

Implementarea rezultatelor cercetării. În baza rezultatelor cercetărilor au fost elaborate două lucrări de laborator la disciplina *Măsurări electronice*. Rezultatele sunt publicate în 17 lucrări științifice. Au fost obținute 10 brevete de invenție și 14 medalii la expoziții internaționale.

Cuvinte-cheie: rezonanță simulată; metoda rezonanței simulate; simulator metrologic de impedanță; circuit rezonant de măsurare; impedanțmetru.

SUMMARY

**of the thesis „Impedance meters with simulated resonance in cartesian coordinates”,
presented by Pavel Nicolaev for the competition of doctor degree in technical sciences**

The thesis was developed at the Technical University of Moldova, Chisinau, it is written in Romanian and contains 120 pages, 70 figures, 8 tables and 173 references. The thesis structure includes: introduction, 5 chapters, conclusions and 6 annexes. The annexes contain 19 figures and 19 tables.

The thesis is devoted to researching the possibilities of using simulated resonance effect for impedance measurement.

The thesis purpose consist in the research and development of means for the impedance measurement on the basis of simulated resonance effect, which are characterized by high accuracy, universality in using, simplicity of construction and practical application

The scientific novelty of the work consist in analyzing the general principles for implementation of simulated resonance method to the impedance measurement; in the synthesis and analysis of metrological simulator of impedance in Cartesian coordinates with advanced features; in the elaboration of the impedance measurement circuit based on simulated resonance effect in Cartesian coordinates; in the elaboration of balancing algorithms for this circuit and in the elaboration of Cartesian coordinates impedance meter.

Theoretical meaning consists in the analysis of implementation principles of simulated resonance method for impedance measurement; in the application of oriented graphs method to the synthesis and analysis of metrological impedance simulator; in the elaboration and analysis of impedance meter structure with simulated resonance in Cartesian coordinates and of its functional algorithm.

Applicative value of the results. Based on the researches, the structure of the impedance meter with simulated resonance was developed for the high accurately measurement of impedance in Cartesian coordinates.

Implementation of research results. Based on the researches, they were developed two laboratory works to discipline *Electronic measurements*. The results are published in 17 scientific papers. 10 patents and 14 medals at international exhibitions were obtained.

Key-words: simulated resonance; simulated resonance method; impedance metrological simulator; resonant measuring circuit; impedance meter.

АННОТАЦИЯ

на диссертацию «Измерители импеданса с имитационным резонансом в декартовых координатах», представленную Николаевым Павлом на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация была разработана в Техническом Университете Молдовы, Кишинэу, оформлена на румынском языке и содержит 120 страницы, 70 рисунков, 8 таблиц и 173 литературных источников. Структура диссертации включает следующие разделы: введение, 5 глав, выводы и 6 приложений. Приложения содержат 19 рисунков и 19 таблиц.

Диссертация посвящена исследованию возможности использования эффекта имитационного резонанса при измерении импедансов.

Целью работы являются исследование эффекта имитационного резонанса и разработка на его основе средств измерения импедансов, характеризующихся высокой точностью, универсальностью использования, простотой конструкции и практического применения.

Научная новизна работы состоит в следующем: анализ общих принципов применения метода имитационного резонанса для измерения импедансов; анализ и синтез метрологического имитатора импеданса с высокими техническими показателями в декартовых координатах; разработка схемы измерения импедансов на основе эффекта имитационного резонанса в декартовых координатах; разработка алгоритма уравнивания этой схемы и разработка измерителя импеданса в декартовых координатах.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем: анализ принципов применения метода имитационного резонанса для измерения импедансов; применение метода графов влияния на анализ и синтез метрологического имитатора импеданса; разработка и анализ структуры и алгоритма работы измерителя импеданса с имитационным резонансом в декартовых координатах.

Практическая ценность результатов состоит в том, что на основе результатов исследований была разработана структура измерителя импеданса с имитационным резонансом для измерения с высокой точностью импеданса в декартовых координатах.

Результаты исследований были внедрены в учебный процесс, в том числе: были разработаны две лабораторные работы по дисциплине: «Электронные измерения», результаты опубликованы в 17 научных работах. Было получено 10 патентов и 14 медалей на международных выставках.

Ключевые слова: имитационный резонанс; метод имитационного резонанса; метрологический имитатор импеданса; резонансная измерительная схема; измеритель импеданса.

NICOLAEV PAVEL

**MĂSURĂTOARE DE IMPEDANȚĂ CU REZONANȚĂ SIMULATĂ ÎN
COORDONATE CARTEZIENE**

273.02 METODE ȘI SISTEME DE CONTROL ÎN METROLOGIE

Autoreferatul tezei de doctor în tehnică

Aprobat spre tipar 24.05.2018

Hârtie ofset. Tipar RISO

Coli de tipar: 2,0

Formatul Hârtiei 60x84 1/16

Tiraj 50 exemplare

Comanda nr. 29

2004, UTM, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168

Eduțura „Tehnica-UTM”,

2045, Chișinău, str. Studenților 9/9