

MĂSURAREA IMPEDANȚEI PRIN METODA DE REZONANȚĂ

V. Nastas, M. Scînteianu
Universitatea Tehnică a Moldovei

INTRODUCERE

Pentru măsurarea cu precizie înaltă a impedanței în prezent se utilizează metoda de echilibrare. Una din implementările acestei metode, cunoscută ca metodă de rezonanță, posedă cea mai simplă structură a circuitelor și algoritmilor de măsurare și poate fi utilizată pentru măsurarea cu precizie înaltă a impedanței cu orice caracter al componentelor. Însă implementarea clasică în așa – numitele aparate, numite “Q-metre” permite de a măsura doar componentele reactive ale impedanței și, în mod indirect, cu precizie mică – componenta activă.

În lucrare se propune o nouă implementare a metodei de rezonanță, bazată pe utilizarea unui simulator de impedanță în calitate de element de referință. Posibilitatea reproducerii impedanței simulate cu orice caracter permite echilibrarea circuitului de măsurare după toate componentele impedanței și, ca urmare, asigură precizia înaltă de măsurare a componentelor ei.

1. METODOLOGIE

Pentru măsurarea directă a componentelor impedanței prin metoda de rezonanță, se formează un sistem rezonant din mărimea pasivă necunoscută Q_X și o mărime de referință (etalon) Q_M alimentat cu un semnal de măsurare. Evident, condiția de rezonanță a sistemului are forma:

$$Q_X = -Q_M. \quad (1)$$

Starea sistemului poate fi determinată prin intermediul funcției de echilibru W , obținute în rezultatul interacțiunii mărimilor Q_X și Q_M cu semnalul de măsurare:

$$W = A_E(Q_X + Q_M), \quad (2)$$

unde A_E - parametrul semnalului de măsurare (tensiune sau curent). Pentru aceasta se utilizează un indicator de nul funcțional cu funcția de transformare F . În dependență de criteriul de

echilibru F al circuitului de măsurare [1], ecuația de echilibru ia forma:

$$F(\dot{W}) = F[\dot{A}_E(\dot{Q}_X + \dot{Q}_M)] = 0. \quad (3)$$

Structura transformării informației în procesul de măsurare, descris de expresia (3), este reprezentată în figura 1. Parametrul semnalului de măsură A_E transformă mărimile pasive Q_X și Q_M în mărimi active \dot{A}_X și \dot{A}_M , a căror sumă va fi, de asemenea, o mărime activă \dot{W} , purtătoare de informație despre starea circuitului rezonant. Mărimea de referință Q_M este formată din mărimea etalon Δq_M comandată de codul digital D , al cărui valoare este reglată de indicatorul de nul funcțional F în dependență de semnalul de dezechilibru W . Utilizarea unuia și aceluiași parametru A_E în transformările $Q_X \rightarrow \dot{A}_X$, $Q_M \rightarrow \dot{A}_M$ asigură invarianța circuitelor rezonante de măsurare (CRM) față de variația lui A_E . Aceasta permite de a simplifica structura din figura 1, excluzând mărimile active \dot{A}_X și \dot{A}_M (figura 2).

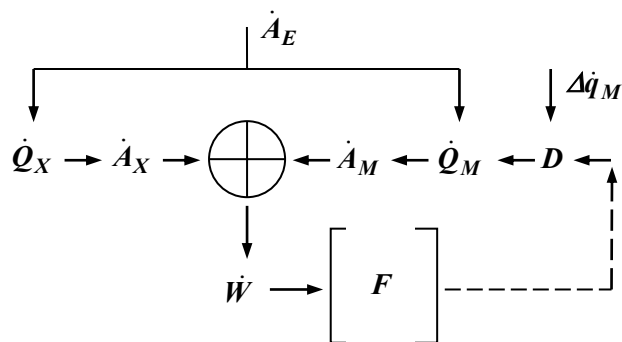


Figura 1. Schema transformării informației în CRM.

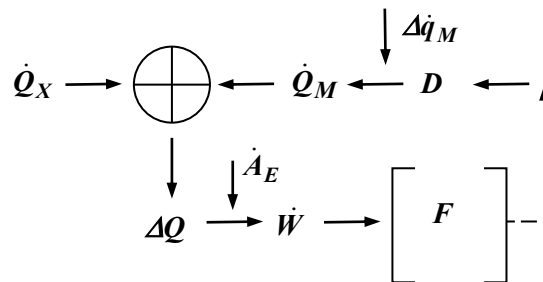


Figura 2. Schema simplificată a transformării informației în CRM.

Pentru realizarea fizică a metodei este necesară obținerea efectului de rezonanță în sistem. Aceasta este posibil la satisfacerea condițiilor:

$$\begin{aligned} \arg(\dot{Q}_X) &= -\arg(\dot{Q}_M), \\ |\dot{Q}_X| &= |\dot{Q}_M|, \end{aligned} \quad (4)$$

considerând că mărimile \dot{Q}_X și \dot{Q}_M pot fi reprezentate în forma:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_X &= |\dot{Q}_X| \exp[\arg(j\varphi_X)], \\ \dot{Q}_M &= |\dot{Q}_M| \exp[\arg(j\varphi_M)]. \end{aligned} \quad (5)$$

În cazul măsurării unei rezistențe active, mărimea \dot{Q}_X are caracter de rezistență activă. Satisfacerea condiției (3) este posibilă numai cu condiția că \dot{Q}_M va avea caracter de rezistență negativă [1, 2]. Atunci:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_X &= |\dot{Q}_X| \exp(j0) = R_X, \\ \dot{Q}_M &= |\dot{Q}_M| \exp(j\pi) = -R_M. \end{aligned} \quad (6)$$

Utilizarea în tehnica măsurărilor a dispozitivelor cu proprietăți de rezistență negativă este condiționată atât de asigurarea preciziei și stabilității parametrilor, cât și de posibilitatea reglării valorilor. Aceasta este posibil numai în cazul simulatoarelor de impedanță pe bază de amplificatoare operaționale [1].

În caz general, la măsurarea unor mărimi complexe pasive este necesară simularea unei mărimi complexe \dot{Q}_M de tipul (5), unde

$$Q_M \in \{0; \infty\}, \quad \varphi_M \in \{0; 2\pi\}.$$

Evident, că \dot{Q}_M poate fi reprezentată și în alt mod:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_M &= \operatorname{Re}(\dot{Q}_M) + j \operatorname{Im}(\dot{Q}_M) = \\ &= Q_M (\cos \varphi_M + j \sin \varphi_M) \end{aligned} \quad (7)$$

și poate fi o impedanță:

$$\dot{Z}_M = Z_M \exp(j\varphi_M) = R_M + jX_M, \quad (8)$$

sau o admitanță:

$$\dot{Y}_M = Y_M \exp(j\varphi_M) = G_M + jB_M. \quad (9)$$

Deși dispozitivele ce realizează mărimi pasive de tipul (5) sunt realizate pe bază de elemente active și consumă energie de la sursa externă, ele pot fi considerate din punct de vedere funcțional ca dipoli ce realizează mărimi pasive de tipul (5). Deoarece, în caz general, mărimile rezonante \dot{Q}_X și \dot{Q}_M sînt complexe, ecuația de echilibru (3) va lua forma:

$$F[\dot{A}_E(\dot{Q}_X + \dot{Q}_M)] = 0. \quad (10)$$

În dependență de caracterul mărimilor \dot{Q}_X și \dot{Q}_M (impedanțe sau admitanțe) ecuația (10) poate fi reprezentată astfel:

$$F[\dot{I}_E(\dot{Z}_X + \dot{Z}_M)] = 0, \text{ pentru impedanțe și } \quad (11)$$

$$F[\dot{U}_E(\dot{Y}_X + \dot{Y}_M)] = 0, \text{ pentru admitanțe, } \quad (12)$$

unde \dot{I}_E, \dot{U}_E - respectiv, curentul și tensiunea de alimentare a circuitului rezonant. Aceste expresii reflectă posibilitatea realizării circuitelor rezonante de măsurare (CRM) în formă de CRM de tip serie, conform (12), sau CRM de tip paralel, conform (13) (fig. 3).

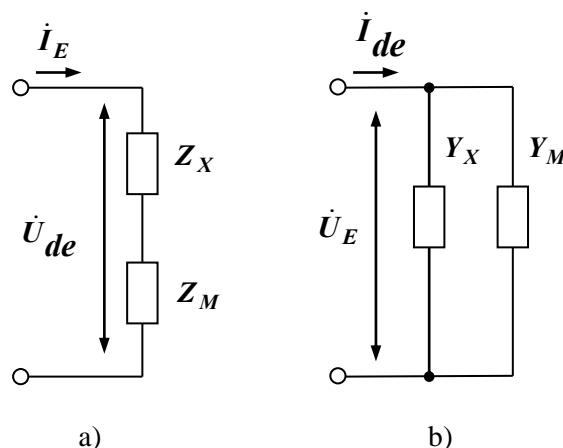


Figura 3. Structura CRM: a) de tip serie; b) de tip paralel.

2. IMPLEMENTARE PRACTICĂ

După cum rezultă din cele expuse, funcția de dezechilibru \dot{W} are forma: pentru CRM serie:

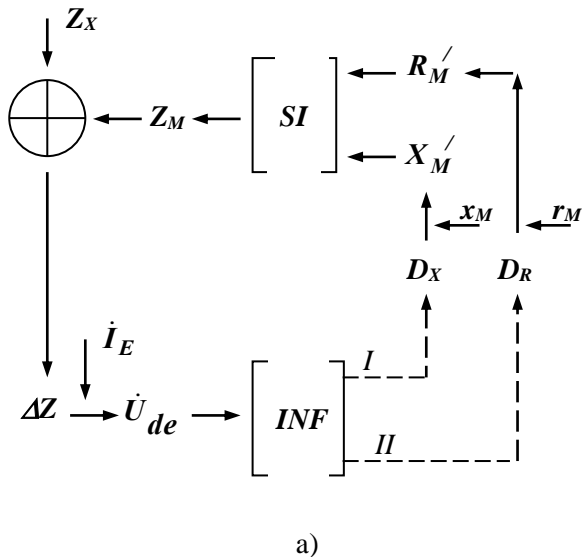
$$\dot{W} = \dot{I}_E(\dot{Z}_X + \dot{Z}_M) = \dot{U}_{de}; \quad (13)$$

pentru CRM paralel:

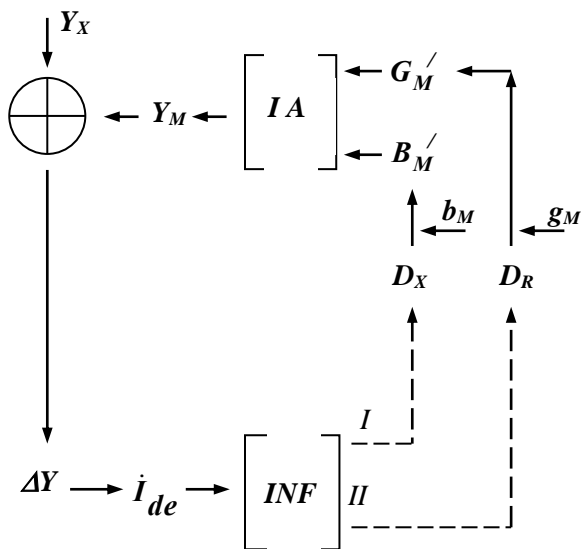
$$\dot{W} = \dot{U}_E (Y_X + Y_M) = \dot{I}_{de} \quad (14)$$

În fig. 4 sînt reprezentate structurile transformării informației în CRM de tip serie (a) și de tip paralel (b). Sub acțiunea semnalului de dezechilibru \dot{U}_{de} (\dot{I}_{de} pentru CRM de tip paralel) indicatorul de nul funcțional (INF) prin intermediul canalelor I și II comandă mărimile digitale D_R , D_X (D_G, D_B) și, prin intermediul lor, valoarea și caracterul impedanței Z_M (admitanței Y_M) simulate.

Luând în considerare dualitatea mărimilor corespunzătoare și a transformărilor topologice care le leagă, analiza CRM poate fi efectuată în formă generalizată.



a)



b)

Figura 4. Schema transformării informației în circuite rezonante serie (a) și paralele (b).

CRM pot fi alimentate atât de o sursă de tensiune, cât și de o sursă de curent. În dependență de metoda de alimentare, poate fi sintetizată o clasă deplină de CRM (tabelul 1). Informația despre starea circuitului rezonant poate fi obținută prin funcțiile de dezechilibru, în calitate de care se utilizează tensiunea \dot{U}_{de} sau curentul \dot{I}_{de} .

Pentru CRM funcția de dezechilibru poate fi de două tipuri (tabelul 1): funcție directă (evidentă):

$$\dot{W} = \frac{\Delta \dot{Q}}{1 + \Delta \dot{Q}/Q_G} \dot{A}_G; \quad (15)$$

funcție inversă (neevidentă):

$$\dot{W} = \frac{I}{1 + \Delta \dot{Q}/Q_G} \dot{A}_G. \quad (16)$$

Din punct de vedere practic prezintă interes funcția de tipul (15), deoarece la echilibrarea completă a CRM:

$$\dot{W} = 0 \text{ și } \Delta \dot{Q} = \dot{Q}_X + \dot{Q}_M = 0. \quad (17)$$

Aceasta permite de a trage concluzia, că pentru CRM de tip serie (tabelul 1) este mai rațional de utilizat în calitate de funcție de dezechilibru căderea de tensiune pe circuitul rezonant \dot{U}_{de} , pentru CRM de tip paralel – curentul \dot{I}_{de} consumat de circuitul rezonant.

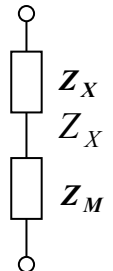
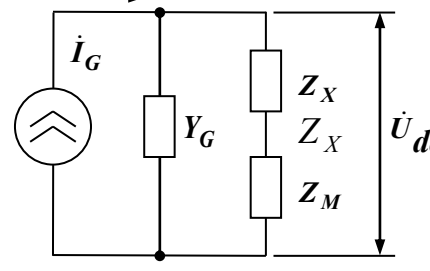
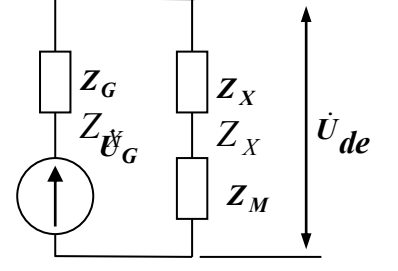
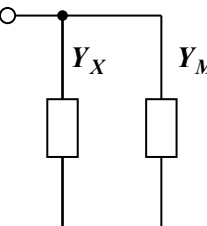
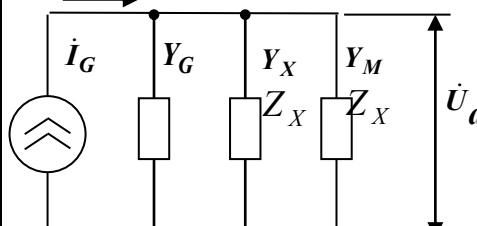
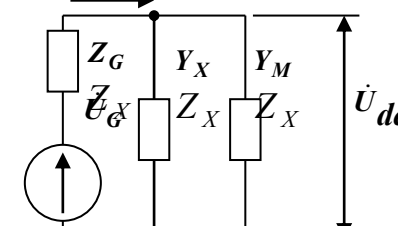
3. SENSIBILITATEA CRM

Un parametru important al CRM este sensibilitatea funcției de dezechilibru \dot{W} față de parametrul simulat Q_M . Sensibilitatea absolută $[S]_{Q_M}^W$ și relativă $[S_0^0]_{Q_M}^W$ a CRM pot fi determinate după expresiile [3]:

$$[S]_{Q_M}^W = \frac{\partial \dot{W}}{\partial Q_M} = A_G \frac{I}{(1 + \Delta Q/Q_G)^2}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} [S_0^0]_{Q_M}^W &= \frac{Q_M}{\dot{W}} \cdot \frac{\partial \dot{W}}{\partial Q_M} = \\ &= \frac{I}{\Delta Q/Q_G} \cdot \frac{I}{1 + \Delta Q/Q_G} \end{aligned} \quad (19)$$

Tabelul 1. Realizarea CRM.

	Cu alimentare de la sursă de curent	Cu alimentare de la sursă de tensiune
<p>CRM serie</p>  <p>$\Delta Z = Z_X + Z_M$</p>	 <p>$\dot{U}_{de} = \dot{I}_G \frac{\Delta Z}{1 + \Delta Z / Z_G} \approx \dot{I}_G \Delta Z$</p> <p>$\dot{I}_{de} = \dot{I}_G \frac{1}{1 + \Delta Z / Z_G} \approx \dot{I}_G$</p> <p>pentru $Z_G \gg \Delta Z$</p>	 <p>$\dot{U}_{de} = \frac{\dot{U}_G}{Z_G} \frac{\Delta Z}{1 + \Delta Z / Z_G}$</p> <p>$\dot{I}_{de} = \frac{\dot{U}_G}{Z_G} \frac{1}{1 + \Delta Z / Z_G}$</p>
<p>CRM paralel</p>  <p>$\Delta Y = Y_X + Y_M$</p>	 <p>$\dot{U}_{de} = \frac{\dot{I}_G}{Y_G} \frac{1}{1 + \Delta Y / Y_G}$</p> <p>$\dot{I}_{de} = \frac{\dot{I}_G}{Y_G} \frac{\Delta Y}{1 + \Delta Y / Y_G}$</p>	 <p>$\dot{U}_{de} = \dot{U}_G \frac{1}{1 + \Delta Y / Y_G} \approx \dot{U}_G$</p> <p>$\dot{I}_{de} = \dot{U}_G \frac{\Delta Y}{1 + \Delta Y / Y_G} \approx \dot{U}_G \Delta Y$</p> <p>pentru $Y_G \gg \Delta Y$</p>

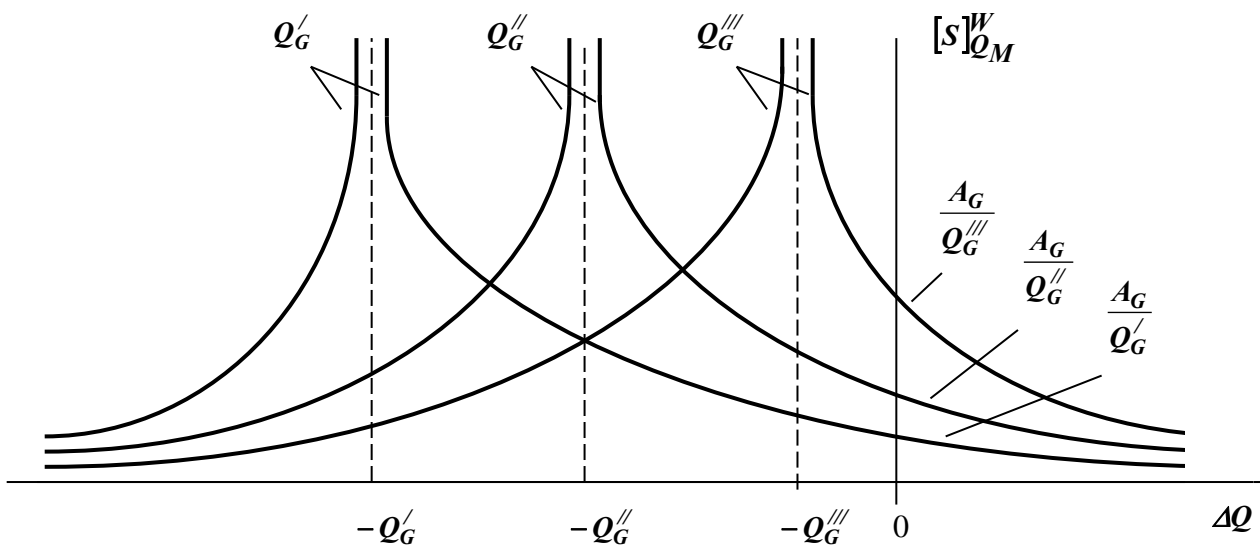


Figura 5. Dependența sensibilității CRM de factorul de dezechilibru ΔQ .

Din (18) și (19) rezultă că sensibilitatea CRM nu este o mărime constantă și depinde de gradul de dezechilibru al CRM ΔQ și de parametrul generatorului Q_G . Dependența sensibilității absolute a CRM de ΔQ pentru diferite valori ale lui Q_G este reprezentată în fig. 5. După cum se observă, punctul $\Delta Q = -Q_G$ este critic pentru CRM. În apropierea acestui punct $[S]_{Q_M}^W$ crește nelimitat și duce la pierderea stabilității sistemului.

Evident, stabilitatea funcționării CRM va fi asigurată la satisfacerea condiției

$$\Delta Q > -Q_G, \quad (20)$$

ce se poate atinge prin alegerea parametrului Q_G sau prin limitarea diapazonului de variație a mărimii Q_M . În starea de echilibru a CRM sensibilitatea atinge valoarea

$$[S]_{\Delta Q}^W \Big|_{\Delta Q = 0} = A_G / Q_G \quad (21)$$

și poate fi majorată prin micșorarea Q_G . Aceasta însă limitează diapazonul de variație a Q_M (21).

CONCLUZII

După cum rezultă din cele expuse, metoda de măsurare prin rezonanță în varianta propusă poate fi utilizată pentru măsurarea cu precizie înaltă, caracteristică metodelor de nul, a impedanței cu orice caracter al componentelor: activ, reactiv sau complex. Deoarece una din impedanțele care formează circuitul rezonant are caracter simulat, considerăm că denumirea mai adecvată a acestei metode ar fi “metoda rezonanței simulate”, denumire ce va fi utilizată în continuare.

Utilizarea simulatorului de impedanță pentru reproducerea mărimii de referință permite de a-i asigura acesteia caracterul necesar, fără utilizarea magazinelor de capacitate și inductanță, fapt care simplifică considerabil implementarea practică și algoritmi de măsurare. Caracterul și mărimile componentelor impedanței de referință pot fi comandate prin cod digital de un microcontroler, care poate fi utilizat și pentru automatizarea măsurărilor.

Bibliografie

1. **Настас В.И.** Методы и средства технологического измерения сопротивления резистивных элементов из изолированного провода // Авто-реферат дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук // – Киев, 1988.
2. **Бенинг Ф.** Отрицательные сопротивления в электронных схемах. Пер. с нем. – М.: Советское радио, 1975.
3. **Карандеев К.Б.** Специальные методы электрических измерений. – М.Л.: Госэнерго-атомиздат, 1963.