

Adam CICHY

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI,
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Rezonansowa metoda pomiaru składowych impedancji jako metoda zerowa, wychyleniowa i quasi-zrównoważona

Dr inż. Adam CICHY

Adiunkt w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji z dziedziny metrologii elektrycznej. Członek SEP, PTETiS i IEEE. Główne zainteresowania naukowe: pomiary składowych impedancji, szczególnie w paśmie częstotliwości podakustycznych, pomiary kąta fazowego.



e-mail: adam.cichy@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przeanalizowano możliwość zaklasyfikowania metody rezonansowej do jednej z głównych klas metod pomiarowych. Wykazano, że metoda rezonansowa może być zakwalifikowana jednocześnie do klasy metod zerowych, niezerowych oraz quasi-zrównoważonych. Oceniono, że istniejący podział metod pomiarowych nie pozwala na jednoznaczne klasyfikowanie metod – istnieją metody pomiarowe spełniające kryteria klasyfikacji do różnych klas pomiarowych lub realizujące jednocześnie pomiar zerowy i niezerowy.

Słowa kluczowe: pomiary składowych impedancji, klasyfikacja metod pomiarowych, metody zerowe, metody niezerowe, układy quasi-zrównoważone.

The resonance method for impedance measurement as a balanced, non-balanced and quasi-balanced method

Abstract

Methods of impedance component measurement can be numbered among two main classes: balanced and non-balanced methods. The criterion of numbering is presence of a standard in the measuring process. In balanced circuits realizing balanced methods the impedance standard is continuously present in the measuring process. The measured quantity is compared directly with the standard. The impedance standard value is variable and changes during the measuring process. The diagram of signal flow in balanced circuits is shown in Fig. 1. In non-balanced circuits the impedance standard is present only in the standardizing process. Then the standard is absent. The diagram of signal flow in non-balanced circuits is shown in Fig. 2. A quasi-balanced circuit is presented in Fig. 3. The quasi-balanced circuits are non-balanced circuits with some features of the balanced circuits. The resonance method of impedance measurement is a method using an electrical resonance phenomenon. A diagram of the resonance circuit is shown in Fig. 4. The resonant circuit is according to literature a non-balanced circuit. This circuit can be, according to equations (1) to (6), included among the balanced circuits or according (7) to (9) classified as a quasi-balanced circuit. The conclusion is that there are some problems with selected circuits to number them among one of the main classes of measuring methods. The resonance circuits are one of them. A new approach to classification is needed.

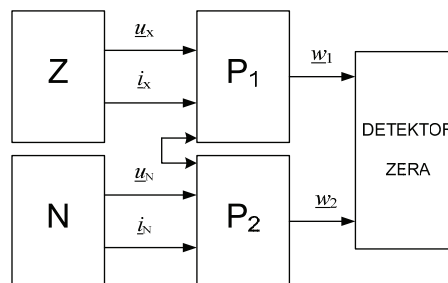
Keywords: impedance measurements, resonant methods, quasi-balanced methods.

1. Wprowadzenie

Metody pomiaru impedancji (a właściwie składowych impedancji) można zaliczyć do dwóch zasadniczych klas – klasy metod zerowych (zrównoważonych) i klasy metod niezerowych (wychyleniowych, wychyleniowych, niezrównoważonych) [1]. W literaturze ze względu na powyższą dychotomię niezaliczenie metody pomiarowej do klasy metod zerowych skutkuje zaliczeniem metody do klasy metod niezerowych i odwrotnie. Można powiedzieć, że

wszystkie metody niebędące metodami zerowymi nazywano metodami niezerowymi. Określenie „metoda zerowa” jest synonimem określenia „metoda zrównoważona” – zerowa różnica sygnałów wyróżnionych oznacza ich równość (równowagę). Podobnie określenie „metoda niezerowa” jest tożsame z określeniem „metoda niezrównoważona” – tu występuje niezerowy sygnał wyjściowy. Ponieważ w czasach, w których powstawała omawiana klasyfikacja metod pomiarowych realizacje metod niezerowych wykorzystywały wychyleniowe wskaźniki sygnału wyjściowego metody te określono mianem „metod wychyleniowych” lub „wychyleniowych”. Kryterium zaliczenia metody do danej klasy metod jest obecność wzorca w procesie pomiarowym [1].

W metodach zerowych porównanie ze wzorcem odpowiedniej składowej następuje bezpośrednio w trakcie pomiaru. Proces pomiarowy wymaga zmiany wartości składowej wzorcowej aż do uzyskania zerowej różnicy pomiędzy tą wartością a wartością składowej mierzonej. Charakterystyczne dla metod zerowych jest możliwość pomiaru obydwu składowych impedancji jednocześnie oraz konieczność wykorzystania dwóch elementów regulacyjnych. Ogólny schemat blokowy układów realizujących metody zerowe przedstawiono na rys. 1.

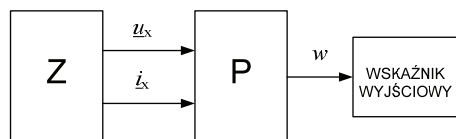


Rys. 1. Ogólny schemat blokowy układów zerowych
Fig. 1. General block diagram of balanced circuits

Z badaną impedancją Z zasilaną z odpowiedniego źródła napięcia lub prądu sinusoidalnie przemiennego (na rys. 1 przedstawioną ogólnie jako blok Z) związane są sygnały napięcia u_x oraz prądu i_x . W bloku przetwornika P_1 omawiane sygnały są przetwarzane na sygnał wyjściowy w_1 . Impedancja wzorcowa Z_N (na rys. 1 przedstawiona ogólnie jako blok N) zasilana jest najczęściej z tego samego źródła napięcia lub prądu sinusoidalnie przemiennego co impedancja badana. Z impedancją wzorcową Z_N związane są sygnały napięcia u_N oraz prądu i_N . W bloku przetwornika P_2 omawiane sygnały są przetwarzane na sygnał wyjściowy w_2 . W detektorze zera sygnały w_1 i w_2 są porównywane. Ich równość (inaczej zerowa różnica – stąd nazwa układów zerowych) oznacza zakończenie procesu pomiarowego i na podstawie tzw. równania równowagi wyznacza się odpowiednie składowe impedancji. Do stanu równowagi sprowadza się omawiane układy poprzez zmianę parametrów przetworników P_1 i P_2 . Przetworniki mogą również oddziaływać na siebie i przetwarzanie sygnałów u_x, i_x, u_N oraz i_N nie odbywa się niezależnie. Nastawy parametrów przetworników nie są również niezależne od siebie, co powoduje problemy ze zbieżnością układów.

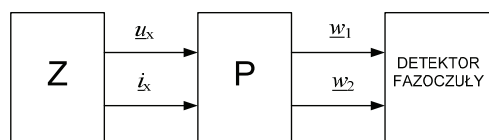
W metodach niezerowych impedancja mierzona generuje sygnały napięcia u_x oraz prądu i_x , które są przetwarzane w przetworniku P na sygnał wyjściowy w . Na jego podstawie odtwarzana jest wartość mierzonej składowej impedancji, na ogół jednej. Wynik pomiaru jest wizualizowany na wskaźniku wyjściowym (bardzo często odtwarzanie składowej mierzonej odbywa się poprzez

odpowiednie wyskalowanie wskaźnika). Wzorzec obecny jest w procesie wzorcowania układu pomiarowego, w samym procesie pomiarowym nie musi być obecny. W układach realizujących metody niezerowe nie ma potrzeby stosowania elementów regulacyjnych w procesie pomiarowym. Ogólny schemat blokowy układów realizujących metody niezerowe przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Ogólny schemat blokowy układów niezerowych
Fig. 2. General block diagram of non-balanced circuits

Istnieją również metody pomiaru składowych impedancji, które zaliczane są do klasy metod niezerowych, charakteryzujące się jednak pewnymi właściwościami metod zerowych. Są to tak zwane metody quasi-zerowe (quasi-zrównoważone) [2]...[6]. Metody powyższe umożliwiają pomiar jednej składowej badanej impedancji przy zachowaniu pewnych cech metod zerowych. W obydwu metodach wyróżnia się szczególnie stan układu, do którego jest on sprowadzany poprzez zmianę nastaw elementów regulacyjnych – w metodach quasi-zrównoważonych występuje tylko jeden element regulacyjny. Na rys.3 przedstawiono ogólny schemat blokowy układów realizujących metodę quasi-zerową [7].



Rys. 3. Ogólny schemat blokowy układów quasi-zrównoważonych
Fig. 3. General block diagram of quasi-balanced circuits

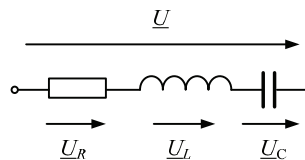
W układach quasi-zerowych stan wyróżniony układu jest na ogół określony poprzez wybrany kąt przesunięcia fazowego pomiędzy dwoma sygnałami wyróżnionymi układu w_1 oraz w_2 . Sygnały wyróżnione są przetwarzane w przetworniku P. Parametry przetwornika są zmieniane do czasu osiągnięcia założonego kąta przesunięcia fazowego pomiędzy wspomnianymi sygnałami. Układy umożliwiają pomiar na ogół jednej składowej i wymagają zastosowania jednego elementu regulacyjnego. Wartość mierzonej składowej wyznacza się na podstawie nastawy elementu regulacyjnego. W procesie pomiarowym może być obecny wzorzec.

Poniżej analizie poddana zostanie możliwość zaliczenia znanej od wielu lat metody pomiarowej – metody rezonansowej – do wybranej klasy metod pomiaru składowych impedancji. Analiza prowadzi do ciekawych wniosków.

2. Metody rezonansowe

Metody rezonansowe wykorzystują zjawisko rezonansu elektrycznego do wyznaczania składowych impedancji dwójnika. Stan rezonansu wykrywany jest na ogół poprzez wykrycie minimum bądź maksimum - odpowiednio prądu lub napięcia, w zależności od struktury obwodu rezonansowego. W podręcznikach metody rezonansowe, ze względu na obecność wychyłowego wskaźnika rezonansu oraz istnienie tylko jednego elementu regulacyjnego, zaliczane są do klasy metod niezerowych. Wspomniana metoda umożliwia pomiar jednej składowej impedancji przy wyskalowaniu jedyne go elementu regulacyjnego. Ponadto jest możliwy pomiar drugiej składowej impedancji - druga składowa odczytywana jest na odpowiednio wyskalowanym wskaźniku rezonansu po sprowadzeniu układu do tego stanu. Na rys.4 przedstawiono schemat szeregowego obwodu rezonansowego. Obiektem badań

może być cewka rzeczywista modelowana przez szeregową gałąź RL lub rzeczywisty kondensator modelowany przez szeregową gałąź RC. W pierwszym przypadku elementem regulacyjnym jest kondensator C, w drugim – cewka L.



Rys. 4. Schemat szeregowego obwodu rezonansowego
Fig. 4. Diagram of a serial resonant circuit

Rozważmy możliwość zaliczenia metody rezonansowej do znanych klas metod pomiarowych. Metoda rezonansowa z reguły zaliczana jest do grupy metod niezerowych. Układ realizujący metodę rezonansową jest zatem powszechnie uznawany za układ niezerowy. W procesie pomiarowym co prawda sprowadza się układ do stanu wyróżnionego (rezonansu prądów lub napięć), jednak traktuje się ten stan jako stan niezerowy. Zwróćmy jednak uwagę na fakt, że w procesie pomiarowym występuje wzorzec – drugi element układu rezonansowego. Ponadto druga składowa badanej impedancji, składowa czynna, wyznaczana jest w stanie rezonansu na podstawie wartości odpowiednio prądu lub napięcia gałęzi rezonansowej. Jest to zatem pomiar niezerowy - wychyłniowy. Poniżej zostanie jednak wykazane, że ze względu na pomiar składowej biernej można uznać układy rezonansowe za układy zerowe.

Sygnałami wyróżnionymi w_1 i w_2 w układzie rezonansowym z rys. 4, zgodnie z rys. 1, mogą być sygnały spadków napięć na cewce i kondensatorze:

$$\begin{cases} w_1 = U_L = \frac{U \cdot j\omega L}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \\ w_2 = U_C = \frac{U \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \end{cases} \quad (1)$$

Sygnały w_1 i w_2 są funkcjami sygnałów prądu i napięcia. W metodach zerowych warunkiem równowagi jest spełnienie równania:

$$w_1 - w_2 = 0. \quad (2)$$

Wstawiając zależności (1) do równania (2) otrzymujemy poniższą zależność

$$\frac{U \cdot j\omega L}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} - \frac{U \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = 0 \Rightarrow \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \quad (3)$$

z której możemy wyznaczyć odpowiednio szukaną składową bierną impedancji cewki rzeczywistej:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (4)$$

o ile wzorcem będzie kondensator C lub też składową bierną impedancji kondensatora rzeczywistego:

$$\omega C = \frac{1}{\omega L}, \quad (5)$$

o ile wzorcem będzie cewka L .

Z powyższych rozważań wynika, że układ rezonansowy może być, ze względu na pomiar składowej biernej traktowany jako układ realizujący zerową metodę pomiarową.

Układ rezonansowy z rys.4 może być także uznany za układ quasi-zrównoważony, co zostanie wykazane poniżej. Przyjmując zgodnie z oznaczeniami z rys. 4 jako sygnały wyróżnione całkowite napięcie na gałęzi RLC oraz spadek napięcia na rezystancji R możemy zapisać:

$$\begin{cases} \underline{w}_1 = \underline{U} \\ \underline{w}_2 = \underline{U}_R = \frac{\underline{U} \cdot R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \end{cases} \quad (6)$$

Stanem wyróżnionym będzie kąt przesunięcia fazowego 0° pomiędzy sygnałami \underline{w}_1 oraz \underline{w}_2 :

$$\angle(\underline{w}_1, \underline{w}_2) = 0^\circ \equiv \text{Im}\left(\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2}\right) = 0. \quad (7)$$

Odpowiednią składową impedancji ωL lub $1/\omega C$ można wówczas wyznaczyć z poniższej zależności:

$$\text{Im}\left(\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2}\right) = \frac{1}{R}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0, \quad (8)$$

z której możemy wyznaczyć odpowiednio szukaną składową bierną impedancji cewki rzeczywistej:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (9)$$

o ile wzorcem będzie kondensator C lub też składową bierną impedancji kondensatora rzeczywistego:

$$\omega C = \frac{1}{\omega L}, \quad (10)$$

o ile wzorcem będzie cewka L . Z powyższych rozważań wynika, że układy rezonansowe mogą być traktowane jako układy realizujące metodę quasi-zerową.

W zależnościach (4) i (5) oraz (10) i (9) występuje pulsacja, a co za tym idzie częstotliwość sygnału zasilającego badaną impedancję. Układ realizujący metodę rezonansową może być sprowadzony do stanu rezonansu poprzez zmianę odpowiednio wzorcowej wartości pojemności lub indukcyjności a także poprzez zmianę częstotliwości. Częściej wykorzystuje się nastawianie pojemności lub indukcyjności, ze względu na możliwość pomiaru wybranej składowej biernej przy założonej częstotliwości. Kryterium zaliczenia metody pomiarowej do wybranej klasy metod jest obecność wzorca w procesie pomiarowym oraz skutek tego porównania – zerowy lub niezerowy. Wybór rodzaju parametru regulowanego nie ma to jednak wpływu na zaliczenie metody do określonej klasy metod pomiarowych. Przez analogię można powiedzieć, że równoważenie mostka prądu przemiennego od częstotliwości mogłoby odbywać się poprzez zmianę nastaw elementów impedancyjnych (tak robi się najczęściej) lub poprzez zmianę częstotliwości – a i tak, ze względu na zerowy sygnał wyjściowy mostek pozostanie układem zerowym.

3. Podsumowanie

Przedstawione powyżej rozważania prowadzą do wniosku, że rezonansowe układy do pomiaru składowych immitancji są jednocześnie układami niezerowymi, zerowymi i quasi-zerowymi. Wynika to ze specyfiki zjawiska rezonansu - w stanie tym występuje równoważenie się napięć na elementach biernych, a zatem gałąź RLC ma charakter gałęzi czynnej, w której kąt fazowy pomiędzy prądem i napięciem gałęzi jest zerowy. Ponadto można zauważyć, że metody zerowe mogą być traktowane jako metody quasi-zrównoważone, w których wybrano kąt fazowy pomiędzy sygnałami wyróżnionymi równy 180° raz dodatkowo określono warunek równości amplitud sygnałów wyróżnionych. Trudność w zaliczeniu metod rezonansowych do klasy metod zerowych lub quasi-zerowych wynika najprawdopodobniej ze sposobu detekcji stanów równowagi lub quasi-równowagi. W metodach rezonansowych detekcja taka odbywa się w sposób pośredni - poprzez wykrycie minimum bądź maksimum prądu lub napięcia.

Układy pomiarowe będące realizacją metody zaliczanej do jednej z podstawowych klas metod pomiaru składowych impedancji charakteryzują się podobnymi właściwościami. Przede wszystkim dotyczy to dokładności pomiaru – ze względu na obecność wzorca oraz pobudliwość detektora stanu wyróżnionego, a także czasu pomiaru – ze względu na ewentualną konieczność sprowadzania układu do wybranego stanu wyróżnionego. Konstruując układy pomiarowe wykorzystuje się wiedzę na temat tychże właściwości. Okazuje się jednak, że mogą istnieć metody, które mogą być zaliczone do kilku klas metod pomiarowych jednocześnie. Przedstawione powyżej rozważania pokazują problemy z zakwalifikowaniem pewnej grupy układów do znanych klas metod pomiarowych. Należałoby ściślej zdefiniować klasy metod pomiarowych i wzajemne relacje pomiędzy nimi.

4. Literatura

- [1] Karandziejew K. B.: Pomiary elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi. WNT, Warszawa 1969.
- [2] Atmanand M. A., Jagadeesh Kumar V., Vempati G. K. Murti: A Microcontroller Based Quasi-Balanced Bridge for the Measurement of L, C and R. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 45, no. 3, June 1996.
- [3] Cichy A., Skórkowski A.: Wirtualny miernik pojemności realizujący quasi-zrównoważoną metodę pomiaru modułu impedancji. Pomiary Automatyka Kontrola 12/2007, str. 94-96.
- [4] Cichy A., Skórkowski A.: Wirtualny quasi-zrównoważony układ do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych. Pomiary, Automatyka, Kontrola 2/2008, str. 48-51.
- [5] Cichy A., Skórkowski A.: Wirtualna realizacja quasi-zrównoważonego miernika do pomiaru wskaźników stanu izolacji elektrycznej typu pojemnościowego. Pomiary, Automatyka, Kontrola 1/2009, str. 34-37.
- [6] Skórkowski A., Cichy A.: Virtual Capacitance Meter Based on Impedance Modulus Measurement. Proceedings of the XIX IMEKO World Congress, pp. 648-651. 6th to 11th September 2009, Lisbon, Portugal.
- [7] Cichy A.: Matematyczny model układów quasi-zrównoważonych. Materiały XII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych „MiSSP 2002”, Krynica 2002.