

Krzysztof MUSIOŁ, Marian KAMPIK, Wojciech BARWINEK
Politechnika Śląska
Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki

WYBRANE IMPLEMENTACJE METODY TRÓJKĄTÓW W KOMPARACJACH IMPEDANCJI

W artykule poruszono problem sprawdzania różnicowych i ilorazowych układów komparacji wzorców impedancji w oparciu o tzw. metodę trójkątów. W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań różnicowego i ilorazowego komparatora impedancji przy wykorzystaniu wyżej wymienionej metody.

Słowa kluczowe: komparator impedancji, spójność pomiarowa, trójkąty metrologiczne, wzorzec impedancji

SELECTED IMPLEMENTATIONS OF THE TRIANGLE METHOD IN IMPEDANCE COMPARISONS

A problem connected with checking of differential and ratio comparator bridges using so called “triangle method” is presented in the paper. Selected results obtained during checking the consistency level of chosen differential and ratio comparator bridge are presented and discussed.

Keywords: impedance comparator bridge, consistency check, metrological triangles, impedance standard

1. WPROWADZENIE

W krajowych instytutach metrologicznych do pomiarów impedancji na najwyższym poziomie dokładności stosowane są metody bezpośredniego porównania ze wzorcem odniesienia. Powszechnie stosowane są mostki prądu przemiennego, wśród których można wyróżnić układy różnicowe o sygnale wyjściowym zależnym od różnicy impedancji porównywanych wzorców [1, 2] i układy ilorazowe (inaczej: stosunkowe), gdzie w wyniku pomiaru otrzymuje się iloraz komparowanych impedancji [3, 4]. W praktyce dominują układy stosunkowe, zwłaszcza, że w ostatnich latach – ze względu na rozwój cyfrowych i kwantowych źródeł napięcia przemiennego – nastąpił powrót do idei komparatora w jego podstawowej konfiguracji z dwoma źródłami napięcia. Niewątpliwą zaletą układów stosunkowych jest możliwość komparacji zarówno wzorców tego samego typu (ang. *like impedances*), jak i różnych typów (ang. *unlike impedances*).

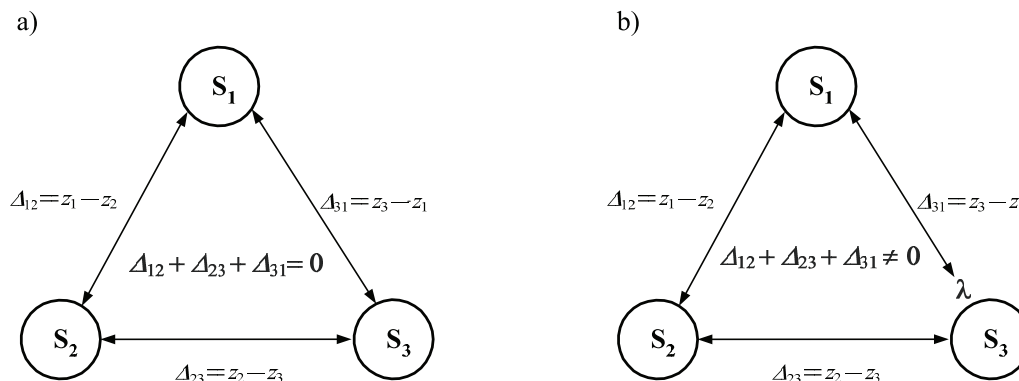
Walidację nowo projektowanych układów komparacji impedancji można przeprowadzić przy użyciu dwóch wzorców o dokładnie znanych parametrach, np. wyznaczonych na drodze komparacji z wzorcem kwantowym. Druga z metod bazuje na trójkątach metrologicznych. Wymaga ona użycia nie dwóch, lecz trzech wzorców, przy czym nie wymaga się tutaj znajomości rzeczywistych wartości impedancji wzorców. Stanowi to istotną zaletę tej metody badań.

Rozważmy trzy wzorce impedancji oznaczone: S_1 , S_2 i S_3 . Wykonajmy pomiary różnic impedancji (lub składowych impedancji) dla każdej z trzech par jaką można utworzyć z grupy trzech obiektów. Schematycznie przedstawiono to na rys. 1. W wyniku pomiarów otrzymuje się trzy różnice:

$$\Delta_{12} = z_1 - z_2, \quad (1)$$

$$\Delta_{23} = z_2 - z_3, \quad (2)$$

$$\Delta_{31} = z_3 - z_1. \quad (3)$$



Rys. 1. Trójkąt różnic układu: a) idealnego, b) rzeczywistego

Zauważmy, że w przypadku idealnego układu pomiarowego, albo w przypadku symulacji przy użyciu liczb dokładnych suma powyższych różnic daje zero:

$$\Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{31} = 0. \quad (4)$$

Schematycznie oznacza to, że trójkąt różnic jest zamknięty (rys. 1a). Jednakże w rzeczywistym układzie pomiarowym powyższa suma jest różna od zera, dlatego trójkąt różnic jest otwarty (rys. 1b). Parametr oznaczony λ jest miarą niedoskonałości narzędzia lub raczej całego systemu pomiarowego. Można go nazwać poziomem spójności wyników pomiarów i wyrazić równaniem:

$$\lambda = \Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{31}. \quad (5)$$

Jako, że w praktyce układy różnicowe stosowane są przy komparacji wzorców o takich samych wartościach nominalnych, to można posługiwać się względnym poziomem spójności λ_{rel} , gdzie bezwzględny poziom spójności λ odniesiony jest do wartości nominalnej wzorca.

W przypadku komparacji ilorazowej grupy trzech wzorców o impedancjach z_1, z_2 i z_3 otrzymuje się następujące ilorazy:

$$r_{12} = \frac{1}{r_{21}} = \frac{z_1}{z_2}, \quad (6)$$

$$r_{23} = \frac{1}{r_{32}} = \frac{z_2}{z_3}, \quad (7)$$

$$r_{31} = \frac{1}{r_{13}} = \frac{z_3}{z_1}, \quad (8)$$

W przypadku idealnego układu pomiarowego (albo w przypadku symulacji przy użyciu liczb dokładnych) iloczyn trzech powyższych ilorazów daje jedność:

$$r_{12} \cdot r_{23} \cdot r_{31} = 1. \quad (9)$$

Schematycznie można uznać, że trójkąt ilorazów jest zamknięty. W praktyce pomiarowej powyższy iloczyn różni się od jedności, dlatego trójkąt ilorazów jest otwarty. Poziom spójności λ można w tym przypadku wyrazić równaniem¹:

$$\lambda = r_{12} \cdot r_{23} \cdot r_{31} - 1, \quad (10)$$

¹ zgodnie z metrologiczną definicją błędu bezwzględnego

W przypadku ilorazowej komparacji impedancji wyniki porównań opisane równaniami (6) ÷ (8) są liczbami zespolonymi: $r_{12} = |r_{12}| \cdot e^{j\varphi_1}$, $r_{23} = |r_{23}| \cdot e^{j\varphi_2}$, $r_{31} = |r_{31}| \cdot e^{j\varphi_3}$, zatem również λ jest liczbą zespoloną. Liczba ta zapisana w postaci wykładniczej:

$$\lambda = |r_{12}| \cdot |r_{23}| \cdot |r_{31}| \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)} - 1e^{j0} \tag{11}$$

zawiera informację o modułowym $|\lambda_m|$ i fazowym λ_f poziomie spójności wyników, które można zdefiniować następująco:

$$\lambda_m = |r_{12}| \cdot |r_{23}| \cdot |r_{31}| - 1 \tag{12}$$

$$\lambda_f = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3. \tag{13}$$

Warto nadmienić, iż parametry λ_m i λ_f nie są modulem i fazą wypadkowego wektora spójności λ , gdyż:

$$\lambda = |\lambda| \cdot e^{j\varphi} \neq \lambda_m \cdot e^{j\lambda_f}. \tag{14}$$

2. IMPLEMENTACJA

2.1. Pomiary różnicowe

Autorzy wraz z zespołem naukowców z Katedry Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) wielokrotnie stosowali metodę trójkątów zarówno podczas budowy, jak i doskonalenia konstrukcji różnicowych komparatorów indukcyjności własnej KWL3, KWL4 i KWL5. W ostatnim czasie dokonano modyfikacji gniazda przyłączeniowego i okablowania komparatora KWL4 będącego obecnie na wyposażeniu KMEiA. W celu potwierdzenia dokładności przyrządu i braku błędów systematycznych wykonano – obok innych testów – testy spójności metodą trójkątów. Zastosowano w nich trzy jednakowe wzorce indukcyjności własnej TS5 o wartościach nominalnych 10 mH. Wzorce umieszczone były w termostacie powietrznym w temperaturze 23°C. W pomiarach wykorzystano procedurę zamiany wzorców miejscami, zatem każdy z trzech wyników różnicy Δ_{xy} (gdzie $x,y=1, 2, 3$ i $x \neq y$) wyznaczono jako średnią arytmetyczną dwóch surowych wyników pomiaru Δ_{xy} i $-\Delta_{yx}$ ². Pomiarów wykonano dla dwóch częstotliwości napięcia zasilającego: 1000 Hz i 1592Hz. Eksperyment pomiarowy powtórzono pięciokrotnie z kilkunastominutowymi przerwami między poszczególnymi seriami. Wyniki pomiarów uzyskane dla jednej z serii pomiarowych przy częstotliwości 1 kHz przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1

Wyniki badań spójności dla zmodernizowanego komparatora KWL4. W dwu ostatnich kolumnach przedstawiono różnice indukcyjności i rezystancji porównywanych wzorców, wytłuszczonym drukiem oznaczono bezwzględne i względne poziomy spójności

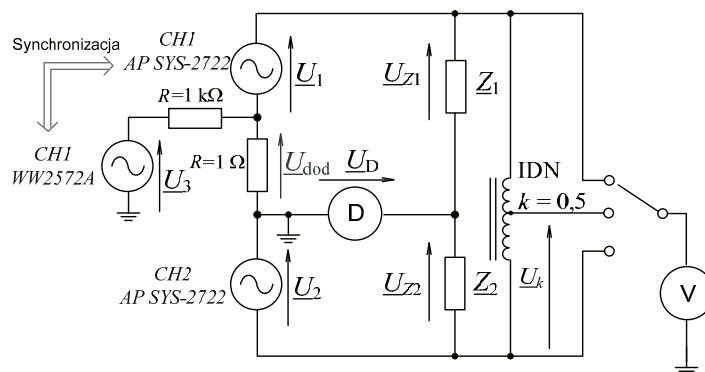
Lp.	Kanał komparatora		Mierzona składowa	
	Kanał A	Kanał B	$\Delta L, \mu H$	$\Delta R, m\Omega$
f=1kHz				
1	TS5 No.01	TS5 No.02	-3,159	-7,15
2	TS5 No.02	TS5 No.01	3,321	11,3
3	TS5 No.01	TS5 No.03	-3,525	-14,8
4	TS5 No.03	TS5 No.01	3,678	18,94
5	TS5 No.02	TS5 No.03	-0,291	-6,61
6	TS5 No.03	TS5 No.02	0,439	10,79
Poziom spójności λ			-0,0035	-1,055
Względny poziom spójności λ_{rel} , ppm			0,35	126

² w rzeczywistym układzie zazwyczaj $\Delta_{xy} \neq -\Delta_{yx}$ ze względu na niewielkie różnice torów pomiarowych

Dla pozostałych serii pomiarowych otrzymano wartości bezwzględne spójności $|\lambda_{rel}|$ mniejsze od przedstawionych w Tabeli 1. Otrzymane wyniki świadczą o bardzo dobrej spójności dla składowej biernej (poniżej 0,4 ppm przy $f=1$ kHz i nieco powyżej 1 ppm przy $f=1592$ Hz). Dla obu częstotliwości pomiarowych spójność składowej czynnej jest na poziomie 1 mΩ. Otrzymane wyniki pozostają w zgodzie z wynikami uzyskanymi na etapie projektowania przyrządu i potwierdzają wysoką dokładność komparatora KWL4.

2.2. Pomiary ilorazowe

W latach 2012÷2014 jeden z autorów pracy kierował projektem badawczym Iuventus Plus finansowanym z polskiego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dotyczącym rozwoju układów do komparacji impedancji. W ramach projektu przeprowadzono m.in. badania stabilności wybranych komercyjnych źródeł napięcia przemiennego pod kątem wykorzystania ich do budowy komparatorów impedancji. W wyniku przeprowadzonych badań na potencjalne źródło zasilające komparator ilorazowy wytypowano dwukanałowy system Audio Precision AP SYS-2722. Generator ten wykazywał (przy zapewnieniu stabilizacji temperatury w pomieszczeniu na poziomie $\pm 0,5^\circ\text{C}$) stabilność stosunku napięć nie gorszą niż $10 \mu\text{V}/\text{V}$ i stabilność różnicy faz większą niż $0,003^\circ$. Na bazie tego źródła zbudowano prototypowy układ komparacji wzorców impedancji oparty o pomiar trzech napięć (rys. 2). Do pomiaru wartości skutecznych napięć wykorzystano wysokiej klasy woltomierz próbkujący Agilent 3458A, a jako detektor zera – woltomierz wektorowy Stanford Research System SRS 830A o czułości 2 nV i napięciu szumów na poziomie $6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. W celu poprawy rozdzielczości nastawy amplitudy i fazy w jednym z ramion wprowadzono dodatkowe źródło połączone z wykorzystaniem dzielnika napięcia. W rzeczywistym układzie komparacji wszystkie połączenia wykonano za pomocą kabli koncentrycznych, na których zastosowano equalizery prądowe w postaci dławików współosiowych.



Rys. 2. Komparator ilorazowy z wykorzystaniem metody pomiaru trzech napięć

W celu zbadania dokładności prototypowego układu wykonano szereg badań, m.in. badanie spójności metodą trójkątów. Do testów spójności wybrano te same wzorce TS5, które wcześniej wykorzystano do badania układu różnicowego. W układzie przedstawionym na rysunku 2 przeprowadzono pomiary stosunków napięć dla grupy trzech wzorców TS5 o numerach: 1, 2 i 3. W pomiarach wykorzystano procedurę zamiany wzorców miejscami, zatem każdy z trzech wyników ilorazu r_{xy} (gdzie $x, y=1, 2, 3$ i $x \neq y$) wyznaczono jako średnią arytmetyczną dwóch wyników surowych r_{xy} i $1/r_{yx}$. Pomiary wykonano dla częstotliwości napięcia zasilającego $f=1000$ Hz. Eksperyment pomiarowy powtórzono pięciokrotnie w pięciu kolejnych dniach. Do obliczeń spójności wyników komparacji wykorzystano zależności (10÷13). Wyniki pomiarów uzyskane dla jednej z serii pomiarowych przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki badań spójności pomiarowej układu komparacji z pomiarem trzech napięć

	Numery porównywanych wzorców TS5		
	1-2	2-3	3-1
Uśredniony stosunek impedancji wzorców r_{xy}	0,9995876+ 0,0000278i	0,9999191+ 0,0001101i	1,0005091- 0,0001483i
Zespolony iloczyn trzech stosunków impedancji: $r_{12} \cdot r_{23} \cdot r_{31}$	1,000015707-0,000010325i		
Zespolony poziom spójności λ	0,000015707-0,000010325i		
Modułowy poziom spójności $\lambda_m (\times 10^{-6})$	18,8		
Fazowy poziom spójności $\lambda_f (\times 10^{-3} \text{ deg})$	0,6		

Dla pozostałych serii pomiarowych otrzymano wartości bezwzględne modułowego i fazowego poziomu spójności mniejsze od przedstawionych w Tabeli 2. Otrzymane wyniki potwierdziły wysoką (na poziomie 10^{-5}) spójność wyników pomiaru stosunku impedancji w układzie komparacji z pomiarem trzech napięć. Świadczy to o usunięciu błędów systematycznych i większych błędów przypadkowych w zaprojektowanym układzie komparacji wzorców impedancji. Głównym czynnikiem determinującym poziom spójności jest w tym przypadku niestabilność źródła użytego do budowy komparatora.

3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono użyteczną metodę sprawdzania układów różnicowych i ilorazowych. Pozwala ona wykrywać błędy systematyczne w układzie i szacować jego niepewność bez potrzeby używania skalibrowanych wzorców impedancji.

Autor wielokrotnie, z sukcesem stosował metodę trójkątów, zwłaszcza na etapie budowy nowych lub modernizacji wcześniej skonstruowanych układów komparacji. Wyniki badań eksperymentalnych dla dwóch wybranych układów przedstawiono w pracy. Stochastyczny charakter poziomu spójności zaobserwowany podczas powtarzania testów spójności świadczy o niewykrywalnie małej wartości braku błędów systematycznych w tych układach. Poziom spójności komparatora różnicowego pozostawał w zgodzie z dokładnością oszacowaną na etapie jego budowy, a poziom spójności komparatora ilorazowego był podstawą do wstępnego oszacowania dokładności układu.

LITERATURA

1. Musioł K., Met A., Skubis T., Automatic Bridge for Comparison of Inductance Standards, Measurement, Volume 43, Issue 10, December 2010, pp. 1661 – 1667.
2. Musioł K., Skubis T.: The use of 1:1 comparator bridge for 10:1 and 1:10 inductance standard transfer. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, Issue: 12, 2014, pp. 3019-3026.
3. Callegaro L., D'Elia V., Kampik M., Kim D., Ortolano M., Pourdanesh F., Experiences with a Two-Terminal-Pair Digital Impedance Bridge, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 6, June 2015.
4. Musioł K., Kampik M., Grzenik M., Barwinek W.: "Consistency check of RLC Bridge Based on Synchronous Sampling System", Proc. of Conference „Problems and Progress in Metrology, Proc. of Metrology Commission of Katowice, Branch of Polish Academy of Sciences, Series: Conferences No. 21, Szczyrk, Poland 05-08 June 2016, pp. 48 – 51.