

Kamil KONTORSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej,
ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra

Badania wpływu długości przewodów łączących na dokładność cyfrowego komparatora niezrównoważonego

Mgr inż. Kamil KONTORSKI

Tytuł zawodowy mgr inż. elektrotechniki o specjalności cyfrowe systemy pomiarowe uzyskał w 2010 roku na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Od 2010 r. jest doktorantem na Uniwersytecie Zielonogórskim. Obszar zainteresowań obejmuje zagadnienia związane z dokładnymi pomiarami wielkości elektrycznych oraz cyfrowym przetwarzaniem sygnałów.



e-mail: k.kontorski@weit.uz.zgora.pl

Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy właściwości metrologicznych układu do pomiaru stosunku impedancji wzorców rezystancji i pojemności elektrycznej o typie wyprowadzeń współosiowym dwuportowym (2TP). W tym celu przedstawiono elementy układu w postaci czwórników i dokonano jego syntezy. Badania symulacyjne miały na celu wyznaczenie błędów pomiaru stosunku impedancji w zależności od długości przewodów łączących elementy komparowane. Wykonano badania eksperymentalne, które weryfikują przyjęty model.

Słowa kluczowe: cyfrowy niezrównoważony komparator impedancji, dzielnik współosiowy, przewody współosiowe, czwórniki.

The measurements of the connecting coaxial cables influence on the digital unbalanced comparator accuracy

Abstract

In this article author analyze metrological properties of the unbalanced electrical impedance comparator arrangement which is able to compare the resistance (R-R) and capacitance (C-C) standards [1]. This setup is presented in Fig. 1. To analyze the measurement system all of the elements were translated into four-terminal elements [4]. Coaxial cables (Fig. 1) were modeled as the serial connection of n four-terminal elements. The electrical schema of the cable is shown in Fig. 2 and the expression (2) describe it. In the Fig. 3 the synthesized simulation system is shown and the expressions (6-7) describe the equations of the measurement arrangement before and after the switch translation (Fig. 1). The Figures 4 and 5 show the simulation results of the relative measurement error against the cable length and the frequency. The Fig. 6 shows the experimental setup used to perform the tests. The experimental and simulation results are listed in Table 1. There is a good agreement between them. In the summary the results are discussed.

Keywords: digital unbalanced impedance comparator, coaxial divider, coaxial cables, four-terminal elements.

1. Wstęp

Dokładne pomiary impedancji znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Pomiary te wykonuje się w układach klasycznych, których budowa opiera się na elementach o silnym sprzężeniu magnetycznym. Od ponad dwudziestu lat pomiary impedancji elementów różnego typu wykonuje się także przy wykorzystaniu układów cyfrowych. Pozwalają one, w porównaniu do układów klasycznych, na mniej skomplikowany pomiar stosunku impedancji elementów różnego typu z niepewnością na poziomie kilku ppm.

W artykule autor przedstawił model układu, którego zasada funkcjonowania jest przedstawiona poniżej i który jest modyfikacją układu z pracy [1]. Model układu przedstawiony w pracy [1] jest bardzo ogólny i nie uwzględnia błędów spowodowanych m.in. przez rezystancje przewodów doprowadzających. W celu stwo-

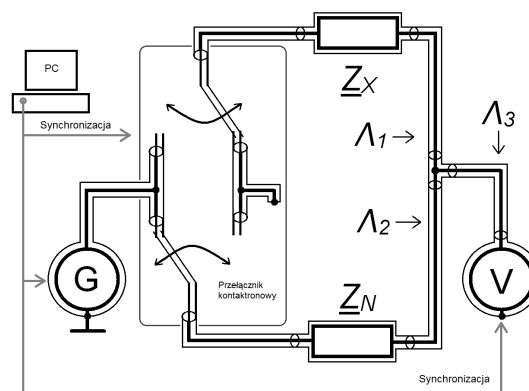
żenia dokładniejszego elektrycznego modelu układu zostały w nim uwzględnione niektóre przewody łączące.

Model uwzględnia część analogową układu zawierającą impedancje komparowane, przewody łączące i te parametry generatora i woltomierza, które oddziałują na układ. Każdy element układu jest przedstawiany w postaci czwórnika o macierzy łączuchowej. Wszystkie elementy układu są zamodelowane jako elementy o parametrach skupionych. Przewody łączące zamodelowane są jako połączenie szeregowo n czwórników.

Dokonano także wstępnej weryfikacji przyjętego modelu dla konkretnej sytuacji komparacji typu R-R.

2. Analizowany układ pomiarowy

Schemat ideowy układu pomiarowego jest przedstawiony na rysunku 1. Napięcie generatora cyfrowego G zasila układ pomiarowy. Impedancje komparowane Z_X i wzorcowa Z_N mają typ wyprowadzeń współosiowy dwuportowy (2TP).



Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego wraz z zaznaczonymi modelowanymi przewodami o długościach A_1, A_2, A_3
Fig. 1. The schematic diagram of the measurement system with the modeled coaxial cables of the lengths equal to A_1, A_2, A_3

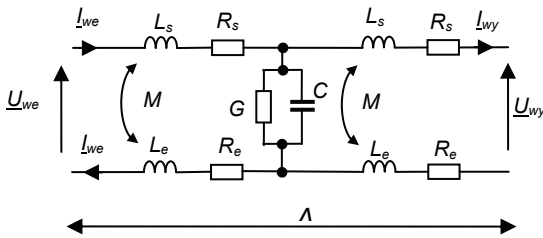
Napięcia mierzone są przez cyfrowy woltomierz próbkujący V, który jest zsynchronizowany z generatorem. Dzięki synchronizacji można uzyskać pełną liczbę okresów każdego z napięć i, co jest bardzo ważne, zachować odstęp czasu, między pomiarami poszczególnych napięć, równy wielokrotności okresu generatora. Przewody koncentryczne oznaczone strzałkami o długościach A_1, A_2, A_3 będą uwzględnione w modelu układu. Przełącznik służy do zamiany miejscami elementów komparowanych w dzielniku współosiowym. Możliwe są dwie konfiguracje układu. Pierwsza, gdy generator jest podłączony do impedancji Z_X , a impedancja Z_N ma jeden z zacisków zwarty z ekranem. Druga, gdy generator jest podłączony do impedancji Z_N , a impedancja Z_X ma jeden koniec zwarty z ekranem.

Metoda pomiaru stosunku impedancji polega na pomiarze zespolonego stosunku napięć, który odpowiada stosunkowi impedancji komparowanych elementów (w modelu uproszczonym). Pomiar jednego z napięć (\underline{U}_V') odbywa się w pierwszej konfiguracji układu, natomiast pomiar drugiego z napięć (\underline{U}_V'') w drugiej konfiguracji. Stosunek impedancji wyznacza się ze wzoru (1).

$$\underline{K}_Z = \frac{\underline{U}_V'}{\underline{U}_V''} \quad (1)$$

3. Model przewodu koncentrycznego

Schemat elektryczny przewodu jest przedstawiony na rysunku 2. Oznaczenia są następujące: \underline{U}_{we} , \underline{I}_{we} - napięcie i prąd wejściowy przewodu, \underline{U}_{wy} , \underline{I}_{wy} - napięcie i prąd wyjściowy przewodu, L_s , R_s , L_e , R_e - indukcyjności własne i rezystancje na jednostkę długości przewodu sygnałowego i ekranu, M - indukcyjność wzajemna, G , C - konduktancja i pojemność międzyprzewodowa, Λ - długość przewodu.



Rys. 2. Zastępczy schemat elektryczny przewodu koncentrycznego
Fig. 2. The electrical schema of the coaxial cable

Sposób syntezy układu poprzez przedstawienie jego elementów w postaci czwórników można spotkać w literaturze [4]. Macierz łańcuchowa przewodu jest opisana równaniem (2), natomiast parametry R i L opisane są równaniami (3-4). Macierz przewodu jest połączeniem szeregowym fragmentów przewodu przedstawionych na rys. 2. Dlatego też długość Λ przewodu jest podzielona na n by ustalić odpowiednie wartości parametrów jednego fragmentu w stosunku do długości całego przewodu. Dalej przyjmuje się, że n równa się 5, gdyż na podstawie obliczeń okazało się, że dalsze zwiększanie tej liczby w pomijalnym stopniu wpływa na zmiany wartości elementów macierzy przewodu.

$$A_p(\Lambda) = \left[\begin{pmatrix} 1 & (R + j\omega L)\frac{\Lambda}{2n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C + G & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & (R + j\omega L)\frac{\Lambda}{2n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right]^n \quad (2)$$

gdzie:

$$R = R_s + R_e, \quad (3)$$

$$L = L_s + L_e - 2M. \quad (4)$$

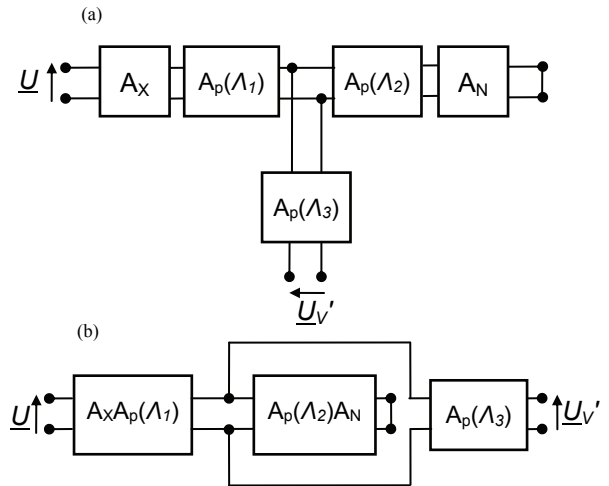
4. Model symulacyjny

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych należy ustalić schemat zastępczy układu. Macierz impedancji mierzonej i wzorcowej są opisane wzorami (5).

$$A_X = \begin{pmatrix} 1 & Z_X \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_N = \begin{pmatrix} 1 & Z_N \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Rys. 3a ilustruje układ komparatora przedstawiony w postaci czwórników dla pierwszej pozycji przełącznika. Rys. 3b przedstawia układ z rys. 3a w postaci dogodnej do wymnożenia macierzy. Układ z rys. 3a opisany jest macierzą A_{U1} (6). W drugiej konfiguracji przełącznika otrzymuje się inną macierz układu A_{U2} opisaną równaniem (7). Przyjęte jest, że macierze są symetryczne.

$$A_{U1}(A_1, A_2, A_3) = A_X A_p(A_1) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \left[A_p(A_2) A_N \right]_{2,2} & 1 \\ \left[A_p(A_2) A_N \right]_{1,2} & 1 \end{pmatrix} A_p(A_3). \quad (6)$$



Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy komparatora zastosowany w badaniach symulacyjnych: (a) - schemat przy pomiarze napięcia \underline{U}_V' , (b) - schemat równoważny z (a) po przekształceniu

Fig. 3. The simplified schematic diagram of the comparator used in simulations: (a) - the schema in the measurement of the \underline{U}_V' voltage, (b) - the schema which is the same as (a) but translated into the appropriate form

$$A_{U2}(A_1, A_2, A_3) = A_N A_p(A_2) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \left[A_p(A_1) A_X \right]_{2,2} & 1 \\ \left[A_p(A_1) A_X \right]_{1,2} & 1 \end{pmatrix} A_p(A_3). \quad (7)$$

Zgodnie z metodą pomiaru opisaną w punkcie 2, stosunek mierzonych napięć \underline{U}_V'' i \underline{U}_V' będzie równy wyrażeniu (8) i będzie odpowiadał stosunkowi impedancji komparowanych.

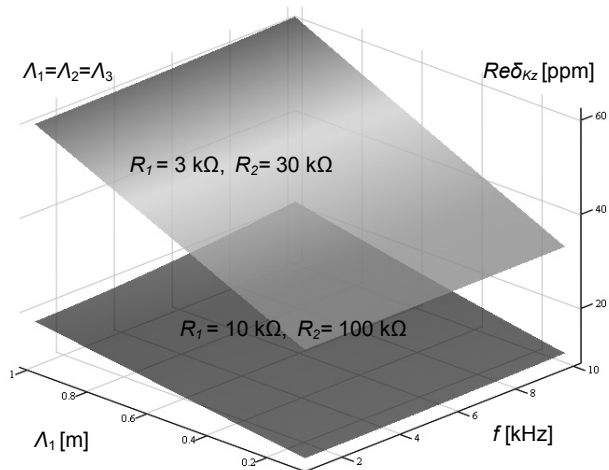
$$\underline{K}_{U'} = \underline{K}_Z = \frac{(A_{U1})_{1,1}}{(A_{U2})_{1,1}} \quad (8)$$

Wartość $\underline{K}_{U'}$ opisana wzorem (8) zależy od parametrów przewodów łączących, od częstotliwości, od rodzaju komparowanych impedancji i impedancji pasożytniczych. Wzory określające błąd bezwzględny i względny wyznaczenia części rzeczywistej stosunku impedancji przedstawione są równaniami (9). Wartość \underline{K}_{Zp} oznacza przyjętą wartość stosunku impedancji, natomiast \underline{K}_Z to wartość obliczona na podstawie (8).

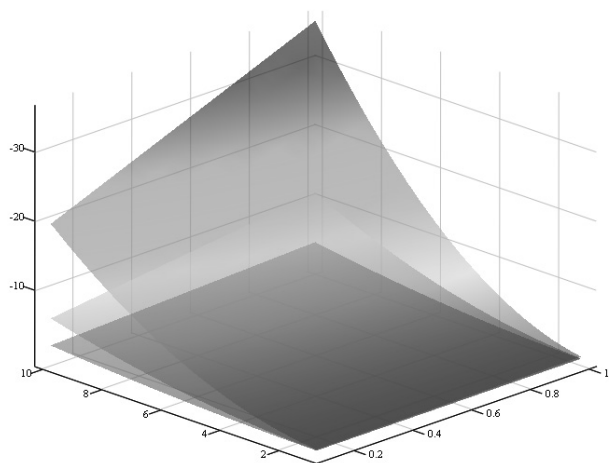
$$\text{Re}\Delta_{K_Z} = \text{Re}(\underline{K}_Z) - \text{Re}(\underline{K}_{Zp}), \quad \text{Re}\delta_{K_Z} = \frac{\text{Re}\Delta_{K_Z}}{|\underline{K}_{Zp}|}, \quad (9)$$

5. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w środowisku Mathcad. W stosunku do przewodów przyjęto parametry przewodu KingSignal RG58: R_e , $R_s = 5 \text{ m}\Omega/\text{m}$, L_e , $L_s = 1 \text{ }\mu\text{H}/\text{m}$ (wartość wyznaczona analitycznie na podstawie [3]), $C = 100 \text{ pF}/\text{m}$ i $G = 10^{-12} \text{ S}/\text{m}$. W modelu uwzględniono także pewne impedancje doziemne komparowanych elementów i impedancję wejściową woltomierza. Umieszczenie i typowe wartości tych elementów opisane są w [2]. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych otrzymanych przy pomocy (9) dla komparacji impedancji tego samego typu R-R i C-C. W osi OX jest długość przewodów w układzie, która zmienia się od 0,1 m do 1 m. W osi OY jest częstotliwość zmieniana od 1 kHz do 10 kHz. W osi OZ jest przedstawiona wartość błędów względnego w ppm. W przypadku komparacji typu R-R błąd ten sięga 60 ppm. W przypadku komparacji C - C błąd ten sięga -30 ppm.



Rys. 4. Błąd względny części rzeczywistej stosunku impedancji elementów typu R-R
Fig. 4. The relative error of the real part of the R-R elements type impedance ratio



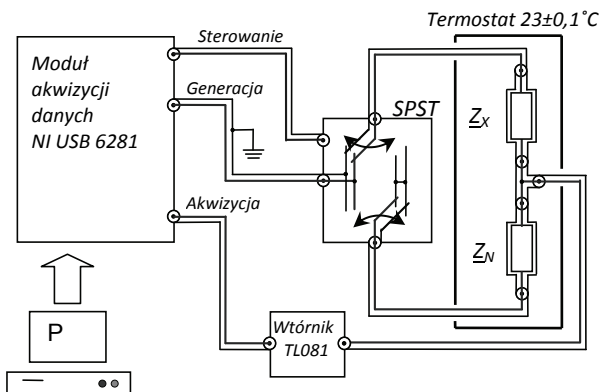
Rys. 5. Błąd względny części rzeczywistej stosunku impedancji elementów typu C-C
Fig. 5. The relative error of the real part of the C-C elements type impedance ratio

6. Wyniki badań eksperymentalnych

Schemat układu eksperymentalnego przedstawiony jest na rys. 6. W łatwy sposób można powiązać elementy tego układu z elementami schematu z rys. 1. Generatorowi i woltomierzowi odpowiada moduł akwizycji danych NI 6281. Także moduł ten odpowiada za synchronizację między generacją i próbkowaniem. Przełącznik oparty jest na przekaźnikach kontaktronowych typu SPST. Występuje także wtórnik oparty na wzmacniaczu TL081 przed wejściem na przetwornik A/C modułu. Na komputerze działa program sterujący napisany w środowisku LabWindows.

Parametry doświadczenia są następujące: częstotliwość sygnału generatora: 10 kHz, amplituda sygnału: 1 V, częstotliwość próbkowania: 500 kHz, zakres napięciowy przetwornika A/C: 1 V, temperatura otoczenia $22^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, rodzaj komparacji i wartości elementów R (10 kΩ) – R (100 kΩ).

Dokonano czterech pomiarów stosunku impedancji dla różnych długości przewodów. W tabeli 1 przedstawiono wyniki otrzymane symulacyjnie i doświadczalnie oraz użyte długości przewodów. Długość danego przewodu zmieniano poprzez dodanie do niego przewodu o długości 0,5 m, a nie poprzez zmianę całego przewodu na dłuższy. W modelu symulacyjnym wartość stosunku impedancji dobrano tak, aby przy pomiarze dla $A_1=1$ m, $A_2=1$ m i $A_3=0,5$ m otrzymać wynik taki sam jak w doświadczalnym pomiarze, w którym otrzymano wartość $0,1000032+j0,0001917$.



Rys. 6. Układ doświadczalny
Fig. 6. The experimental setup

Tab. 1. Wybrane wyniki pomiarów i badań symulacyjnych (10 kHz, 10 kΩ - 100 kΩ)
Tab. 1. The chosen experimental and simulation results (10 kHz, 10 kΩ - 100 kΩ)

Konfiguracja przewodów	Wynik otrzymany z modelu [V/V]	Wynik doświadczalny [V/V]*
$K_U (A_1=1, A_2=1,5, A_3=0,5)$	$0.1000031+j0.0001917$	$0.1000030+j0.0001917$
$K_U (A_1=1,5, A_2=1, A_3=0,5)$	$0.1000038+j0.0001920$	$0.1000039+j0.0001919$
$K_U (A_1=1, A_2=1, A_3=1)$	$0.1000033+j0.0001918$	$0.1000031+j0.0001917$

* Niepewność bezwzględna typu A jest na poziomie $1 \cdot 10^{-7}$ [V/V] ($k=1$)

7. Wnioski

Model dla przeprowadzonego eksperymentu jest poprawny jak wynika to z tabeli 1. Jednak po uwzględnieniu rezystancji styku przewodu dodawanego (tego o długości 0,5 m) o wartości $0,2 \Omega$ uzyskana została lepsza zgodność wyników. Rezystancje styków podobnie jak przewody łączące są powodem błędów pomiaru.

W przedstawionym układzie uziemiony jest jeden z zacisków generatora, co sprawia, że prąd płynący przez impedancje wraca przez ich ekrany do źródła. W ten sposób indukcyjności przewodów są znacznie zredukowane. W pracy [1] uziemienia są dołączone w miejscach, gdzie zwiera się jedną końcówkę impedancji z ekranem. Prąd wtedy płynie przez pewien krótszy odcinek przewodu do źródła i powoduje mniejsze spadki napięcia na swojej drodze. Wpływ rezystancji ekranów jest szczególnie widoczny przy komparacji impedancji typu rezystancyjnego. Im mniejsze rezystancje są komparowane tym błąd jest większy, co jest zobrazowane na rys. 4. Autor rozważa metodę pomiaru impedancji o typie wyprowadzeń 4TP wykorzystującą pomiar zespolonego stosunku napięć.

8. Literatura

- [1] Kontorski K., Pomiar stosunku impedancji wzorcowych w układzie komparatora z zastosowaniem metody przestawiania, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 4, 2013.
- [2] Rybski R., Kontorski K.: Ocena wpływu impedancji pasożytniczych na dokładność cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 2, 2011.
- [3] Rosa E.B.: The Self and Mutual Inductances of Linear Conductors. *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol. 4, no 2, 1908, pp. 332–333.
- [4] Puśledzki J.: Liczalny sposób wyznaczania dokładności komparatora admittancji, *Elektryka - Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, z. 92, 1984.