

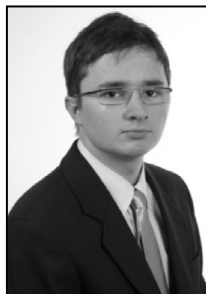
**Kamil KONTORSKI**

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej,  
ul. Ogrodowa 3b, 65-462 Zielona Góra

## Pomiary stosunku impedancji wzorcowych w układzie komparatora z zastosowaniem metody przestawienia

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

W artykule przedstawiona jest metoda pomiaru stosunku impedancji dwuportowych, współosiowych w zakresie (10 – 100) kΩ typu R-R, C-C, a także R-C z wykorzystaniem cyfrowego modułu pomiarowego. Badania miały na celu weryfikację dokładności nowego układu komparatora. Otrzymane wyniki pomiarów porównano z wynikami otrzymanymi klasycznym mostkiem transformatorowym. Dokonano analizy błędów układu i wskazano możliwości ich poprawy.

**Słowa kluczowe:** stosunek impedancji, impedancje pasożytnicze, zespolony stosunek napięć, próbkujący moduł pomiarowy, mostek transformatorowy.

### Comparisons of impedances with the complex voltage ratio measurement

#### Abstract

In the paper there is presented a new scheme of an unbalanced impedance comparator for measuring two terminal pair, coaxial impedance ratio with a complex voltage ratio (CVR). In the introduction there is given a description of classical and digital comparators. Fig. 1 shows the schematic diagram of a comparator. It contains a digital generator G, digital sampling voltmeter channels  $V_1, V_2$ , impedances  $Z_X, Z_N$  whose ratio is to be determined and reed relays  $K_1$  and  $K_2$ . Parasitic impedances in the comparator are denoted as  $Z_D$  [2]. The next section presents mathematical explanation how the impedance ratio is achieved using  $\underline{U}_{r1}, \underline{U}_{r2}, \underline{U}_{r1}', \underline{U}_{r2}'$  voltages derived by DFT from the gathered probes. The expression (7) is true if the generator voltage between measurements is constant. The experimental results of comparison of 6 impedances: 4 resistive type impedances of the nominal values of 10 kΩ ( $R_3, R_4$ ), 100 kΩ ( $R_1, R_2$ ) and two capacitive impedances of the nominal values of 3 nF ( $C_1, C_2$ ) are given in Table 1. The left column presents the type of comparison. In the middle one there are given the results obtained by the comparator and in the right - the real parts of the impedance ratio obtained from a transformer bridge. Fig. 2 shows the experimental results to check if there is really the same voltage in the time of measurement. Summing up, these are the preliminary results and the comparator has to be investigated under other metrological conditions.

**Keywords:** impedance ratio, stray, parasitic impedances, complex voltage ratio, sampling voltmeter, transformer bridge.

### 1. Wstęp

Dokładne pomiary impedancji znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Przykładem mogą tu być różnego rodzaju kalibratory elektroniczne, których dokładność często zależy od dokładności określenia wartości impedancji wzorca odniesienia.

Bardzo istotną rzeczą w dokładnych pomiarach impedancji jest jej przekazywanie innym wzorcom. Do tego służą komparatory, które wyznaczają stosunek dwóch impedancji. Dokładna znajomość jednej z impedancji w komparatorze pozwala na wyznacze-

nie wartości drugiej impedancji z taką samą dokładnością jeżeli proces komparacji jest wykonany z odpowiednio dużą dokładnością. W układach klasycznych komparatorów i mostków impedancji można dojść z dokładnością komparacji do poziomu  $1 \cdot 10^{-8}$ , a nawet lepszego [9].

Układy klasyczne do komparacji impedancji cechują się dużą złożonością elementów wchodzących w ich skład. Przykładem mogą być mostki kwadraturowe, w których porównuje się ze sobą elementy wzorcowe typu pojemnościowego i rezystancyjnego [8]. Dawniej mostki tego typu służyły do przekazywania impedancji elementów typu pojemnościowego na elementy typu rezystancyjnego, które z kolei służyły do określenia jednostki oma [9]. Obecnie, gdy wartość oma jest znana z dużą dokładnością przy prądzie stałym dzięki efektowi Halla, prowadzone są badania mające na celu przekazanie wartości impedancji elementów typu rezystancyjnego na elementy typu pojemnościowego [7]. W skład klasycznych układów do komparacji impedancji wchodzi elementy o silnym sprzężeniu magnetycznym np. indukcyjne dzielniki napięcia oraz elementy typu wzorcowe dekady rezystorowe i pojemnościowe o dużej ilości nastaw.

Od początku lat 90-tych rozwinęła się tendencja konstruowania cyfrowych mostków pomiarowych lub inaczej cyfrowych komparatorów impedancji. Było to możliwe dzięki znacznemu rozwojowi w dziedzinie układów cyfrowych. Układy takie w stosunku do klasycznych układów do pomiaru impedancji cechują się znacznie prostszą konstrukcją. Elementy cyfrowe umożliwiają na synchronizację między sobą, pozwalają na nastawę kąta fazowego w szerokim zakresie i dzięki nim możliwa jest automatyzacja pomiarów. Wciąż powstają nowe prace związane z pomiarami za pomocą cyfrowych komparatorów impedancji [4, 5, 8].

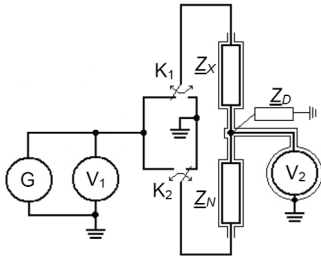
W układach obecnie stosowanych komparatorów impedancji wymagana jest duża rozdzielczość nastaw wartości amplitudy i fazy, aby układ zrównoważyć. Po zrównoważeniu układu mierzy się spadki napięć na porównywanych impedancjach w celu wyznaczenia stosunku napięć, który z założenia powinien być równy stosunkowi impedancji. Wymagania co do rozdzielczości nastaw generatorów mogą być obniżone w układach komparatorów niezrównoważonych, gdzie dodatkowo mierzy się napięcie niezrównoważenia. Napięcie niezrównoważenia jest mierzone, także w układach zrównoważonych, więc nie powoduje to komplikacji układu. Dokładność tych układów jest na nieco niższym poziomie niż układów zrównoważonych, na co wskazują doświadczalne badania przedstawione w [3].

Autor badając komparatory niezrównoważone doszedł do ciekawych spostrzeżeń i rozwiązań układowych, które pozwalają na pomiar stosunku impedancji względnie prostymi metodami [1]. Pewien odmienny układ komparatora chciałby zaprezentować w niniejszym artykule do wyznaczenia stosunku impedancji typu R-R, C-C.

### 2. Układ pomiarowy i metoda pomiaru

Schemat ideowy układu pomiarowego jest przedstawiony na rys. 1. Zostanie on omówiony i przedstawione zostaną także elementy występujące w doświadczalnym układzie, którym wykonywane były pomiary. Napięcie generatora cyfrowego G (HP33120A) zasila układ pomiarowy. Impedancje komparowane  $Z_X$  (nieznana) i impedancja wzorcowa  $Z_N$  mają typ wyprowadzeń współosiowy dwuportowy i są umieszczone w termostacie o temperaturze  $(26 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ . Interpretację fizyczną elementu  $Z_D$  zastępującego impedancje pasożytnicze opisano w [2, 4]. Ten element impedancyjny najbardziej wpływa na wartość napięcia niezrównoważenia. W punktach, gdzie znajdują się symbole wol-

tomierzy  $V_1$  i  $V_2$  mierzone są odpowiednio napięcia  $\underline{U}_{V1}$  i  $\underline{U}_{V2}$  za pomocą modułu cyfrowego (NI USB-6211) sterowanego poprzez magistralę USB. Moduł posiada jeden 16-bitowy przetwornik A/C i wbudowany multiplexer do przełączania kanałów. Kolejnymi elementami w układzie są kontaktrony  $K_1$  i  $K_2$ , które służą do przełączenia sygnału zasilania układu lub inaczej służą do automatycznego przestawienia impedancji w układzie. W układzie występuje synchronizacja między napięciem generowanym, napięciem sterowania kontaktronami i pobieranymi próbkami napięcia co zapewnia dużą dokładność pomiaru amplitudy i fazy sygnału [8]. Wszystkie przewody i elementy układu doświadczalnego są ekranowane od wpływu sygnałów o wyższych częstotliwościach. Potencjały ekranów mają wartość potencjału odniesienia.



Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego  
Fig. 1. Schematic diagram of the measurement system

Metoda pomiaru stosunku impedancji polega na podwójnym pomiarze zespolonego stosunku napięć. Pierwszy z nich to iloraz napięcia na wyjściu generatora  $\underline{U}_{V1}'$  i napięcia w punkcie połączenia elementów komparowanych  $\underline{U}_{V2}'$ , gdy przełącznik  $K_1$  jest zwarty do przewodu sygnałowego, a przełącznik  $K_2$  jest zwarty z masą układu. Stosunek tych napięć to względne napięcie niezrównowazenia i będzie oznaczane przez  $\underline{U}_{D1,r}$ . Pomiar drugiego stosunku napięć  $\underline{U}_{V1}''/\underline{U}_{V2}''$  odbywa się, gdy przełącznik  $K_2$  jest zwarty do przewodu sygnałowego, a przełącznik  $K_1$  jest zwarty z masą układu. Drugi stosunek napięć będzie oznaczany jako  $\underline{U}_{D2,r}$ . Sposób próbkowania kilku napięć jednym przyrządem jest opisany w [4]. Przełączniki przełączają się z częstotliwością 1 Hz, a wartości amplitud i faz sygnałów liczone są za pomocą DFT na podstawie zebranych próbek. Częstotliwość próbkowania dobiera się tak by zapewnić jak największą i całkowitą ilość próbek przypadającą na okres sygnału mierzonego.

### 3. Wyznaczanie stosunku impedancji

Impedancje pasożytnicze wpływają na wynik pomiaru w komparatorze niezrównoważonym [2]. Przez zastępczą impedancję pasożytniczą  $\underline{Z}_D$  (rys. 1), płynie prąd co sprawia, że nie można wyznaczyć stosunku impedancji na podstawie napięć  $\underline{U}_{V1}$  i  $\underline{U}_{V2}$  bez uwzględnienia jej obecności. Dlatego też w pomiarze jest ona uwzględniona, a jej wpływ wyeliminowany. Poniżej zostanie omówione postępowanie prowadzące do wyznaczenia stosunku impedancji na podstawie zmierzonych wcześniej stosunków napięć. Jest ono odmianą sposobu pomiaru przedstawionego w publikacji [1].

Równanie napięć w układzie przedstawionym na rys. 1, gdy kontaktron  $K_1$  jest zwarty z przewodem sygnałowym, a  $K_2$  z masą układu można zapisać, jako:

$$\underline{U}_{V2}' = \underline{U}_{V1}' \frac{\underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X + \underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D} \quad (1)$$

Równanie napięć w sytuacji odwrotnej, gdy kontaktron  $K_2$  jest zwarty z przewodem sygnałowym, a  $K_1$  z masą układu można zapisać, jako:

$$\underline{U}_{V2}'' = \underline{U}_{V1}'' \frac{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D + \underline{Z}_N} \quad (2)$$

W wyniku zsumowania lewych i prawych stron zależności (1) i (2) otrzymuje się równanie napięć w klasycznym komparatorze z dwoma źródłami zasilania. Suma ta wynosi:

$$\underline{U}_{V2}' + \underline{U}_{V2}'' = \underline{U}_{V1}' a + \underline{U}_{V1}'' b, \quad (3)$$

gdzie zgodnie z wzorami (1) i (2):

$$a = \frac{\underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X + \underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D} = \frac{\underline{U}_{V2}'}{\underline{U}_{V1}'} = \frac{1}{\underline{U}_{D1,r}}, \quad (4)$$

$$b = \frac{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D + \underline{Z}_N} = \frac{\underline{U}_{V2}''}{\underline{U}_{V1}''} = \frac{1}{\underline{U}_{D2,r}}. \quad (5)$$

W równaniu (3) suma po lewej stronie odpowiada napięciu niezrównowazenia w komparatorze z dwoma cyfrowymi źródłami, a po prawej stronie napięcia  $\underline{U}_{V1}'$  i  $\underline{U}_{V1}''$  odpowiadają napięciom zasilania układu. Znając wartości współczynników  $a$  i  $b$  (z równań (1) i (2)) można wyznaczyć wartość stosunku napięć odpowiadającą napięciu niezrównowazenia równemu 0. Zgodnie z [1] stosunek ten będzie wynosił:

$$\underline{K}_U = -\frac{b}{a} = -\frac{\underline{U}_{D1,r}}{\underline{U}_{D2,r}} = -\underline{K}_Z. \quad (6)$$

W równaniu (6) znak przy stosunku napięć niezrównowazenia zależy od przyjętych zwrotów napięć zasilania.

Łatwo zauważyć, że powyższy układ w obydwu pozycjach przełączników jest dzielnikiem napięcia złożonym z impedancji komparowanych. Napięcie generowane jest napięciem zasilania dzielnika natomiast drugie napięcie, które powinno być przyłożone symetrycznie do przeciwległej impedancji wynosi 0 V względem napięcia odniesienia układu. Na podstawie równań (4), (5), (6) otrzymuje się wyrażenie określające stosunek impedancji w postaci:

$$\underline{K}_Z = \frac{\underline{U}_{V1}' \underline{U}_{V2}''}{\underline{U}_{V2}' \underline{U}_{V1}''}. \quad (7)$$

Z równania (7) wynika, że stosunek impedancji jest równy iloczynowi dwóch stosunków napięć.  $\underline{U}_{V1}'$  i  $\underline{U}_{V1}''$  to zespolone wartości napięcia zasilania w pierwszym i w drugim przełączeniu kontaktronów. Jeżeli zapewni się stałość napięcia zasilania w obydwu przełączeniach to stosunek  $\underline{U}_{V1}'$  i  $\underline{U}_{V1}''$  będzie z dużą dokładnością równy 1. Wtedy jedynym pomiarem jaki będzie potrzebny do wyznaczenia stosunku impedancji będzie stosunek napięć wyrażony równaniem (8) postaci:

$$\underline{K}_Z = \frac{\underline{U}_{V2}''}{\underline{U}_{V2}'}. \quad (8)$$

W następnych rozdziałach zostanie przeprowadzona weryfikacja doświadczalna powyższej metody pomiarowej i zostanie podjęta próba określenia niepewności pomiaru.

### 4. Badania doświadczalne

Wyznaczone stosunki impedancji za pomocą komparatora porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą klasycznego mostka transformatorowego zbudowanego z binarnych indukcyjnych dzielników napięcia. W doświadczeniu użyto dwóch wzorcowych rezystorów o wartościach nominalnych 100 kΩ ( $R_1$ ,  $R_2$ ), dwóch o wartościach 10 kΩ ( $R_3$ ,  $R_4$ ) i kondensatorów o wartościach 3 nF ( $C_1$ ,  $C_2$ ). Pomiary przeprowadzono dla dwóch różnych częstotliwości. Wyniki zestawiono w tabeli 1. Kolumna po lewej stronie oznacza zapis przeprowadzonych komparacji. Przykładowy zapis o postaci ( $R_1$ - $R_2$ ) oznacza stosunek wartości impedancji elementu

$R_1$  typu rezystancyjnego do wartości impedancji elementu  $R_2$  także typu rezystancyjnego. Z kolei przykładowy zapis  $(R_3-C_2)$  oznacza stosunek wartości impedancji elementu rezystancyjnego  $R_3$  do impedancji elementu pojemnościowego  $C_2$ . W drugiej kolumnie przedstawione są wartości zmierzonego stosunku napięć w przypadku porównania R-R lub iloraz stosunków napięć dla porównania R-C. Przykładowy zapis  $(R_1-C_1) / (R_2-C_1) = (R_1-R_2)$  oznacza iloraz stosunku impedancji elementów  $(R_1-C_1)$  do stosunku impedancji elementów  $(R_2-C_1)$ . Dzięki temu otrzymuje się iloraz impedancji elementów tego samego typu, na podstawie stosunku impedancji elementu rezystancyjnego i pojemnościowego co pozwala na pewną identyfikację poprawności porównania elementów typu R-C. W trzeciej kolumnie znajdują się wyniki pomiaru stosunku impedancji elementów tego samego typu otrzymane mostkiem transformatorowym. Jest to metoda odniesienia pozwalająca na porównanie dokładności omawianego komparatora. Pomiaru stosunku impedancji typu C-C nie były przeprowadzane, ponieważ przełączanie kontaktów przy obciążeniu tylko pojemnościowym mogło by wywołać duże prądy rozładowania kondensatorów.

Tab. 1. Wyniki pomiarów porównania impedancji  
Tab. 1. The experimental results of impedance comparison

Zapis przeprowadzonych porównań	Poszczególne wyniki porównania i średnie wyniki stosunku $R_1-R_2$ , $R_3-R_4$ i $C_1-C_2$ [V/V] <sup>1)</sup>	Wyniki otrzymane mostkiem [V/V] <sup>2)</sup>
512 Hz		
$(R_1-R_2)$	$0,999907 - j9 \cdot 10^{-7}$	0,999906
$(R_3-R_4)$	$1,000005 - j5 \cdot 10^{-7}$	1,000000
$(R_1-C_1) / (R_2-C_1) = (R_1-R_2)$	$\frac{0,000136 + j0,965483}{0,000135 + j0,965577} = 0,999903 - j9 \cdot 10^{-7}$	0,999906
$(R_1-C_2) / (R_2-C_2) = (R_1-R_2)$	$\frac{0,000136 + j0,966881}{0,000136 + j0,966972} = 0,999906 - j5 \cdot 10^{-7}$	0,999906
$(R_1-C_2) / (R_1-C_1) = (C_1-C_2)$	$\frac{0,000136 + j0,966881}{0,000136 + j0,965483} = 1,001448 + j4 \cdot 10^{-7}$	1,001451
$(R_2-C_2) / (R_2-C_1) = (C_1-C_2)$	$\frac{0,000136 + j0,966972}{0,000135 + j0,965577} = 1,001445 - j1 \cdot 10^{-7}$	1,001451
5120 Hz		
$(R_1-R_2)$	$0,999909 - j7 \cdot 10^{-6}$	0,999909
$(R_3-R_4)$	$1,000005 + j2 \cdot 10^{-6}$	0,999998
$(R_3-C_1) / (R_4-C_1) = (R_3-R_4)$	$\frac{0,000245 + j0,966172}{0,000247 + j0,966175} = 1,000003 - j2 \cdot 10^{-6}$	0,999998
$(R_3-C_2) / (R_4-C_2) = (R_3-R_4)$	$\frac{0,000322 + j0,967613}{0,000321 + j0,967617} = 1,000003 + j1 \cdot 10^{-6}$	0,999998
$(R_3-C_2) / (R_3-C_1) = (C_1-C_2)$	$\frac{0,000322 + j0,967613}{0,000245 + j0,966172} = 1,001492 - j8 \cdot 10^{-5}$	1,001474
$(R_4-C_2) / (R_4-C_1) = (C_1-C_2)$	$\frac{0,000321 + j0,967617}{0,000247 + j0,966175} = 1,001492 - j7,6 \cdot 10^{-5}$	1,001474

<sup>1)</sup> Niepewność typu A części rzeczywistej i urojonej każdego stosunku napięć jest oszacowana na poziomie  $\pm 2$  ppm

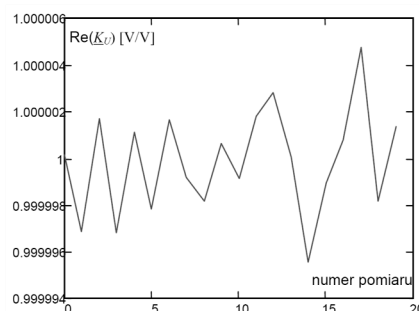
<sup>2)</sup> Przedstawiona jest wartość części rzeczywistej stosunku impedancji otrzymanej mostkiem transformatorowym, której niepewność pomiaru wynosi  $\pm 2$  ppm

Wartości elementów tworzących impedancje i częstotliwość napięcia zasilającego dobiera się tak, aby zapewnić stosunek impedancji równy w przybliżeniu 1. Dzięki temu mierzone napięcia  $\underline{U}_{V2}'$  i  $\underline{U}_{V2}''$  mają zbliżone wartości, co pozwala na dokładniejszy pomiar ich stosunku. Dla porównania typu R-C dla częstotliwości 5120 Hz porównywane są impedancje o module 10 k $\Omega$ . Dla szczególnej porównania  $(R_1-R_2)$  wartości modułów wynoszą 100 k $\Omega$ . Dla częstotliwości 512 Hz porównywane są impedancje o module 100 k $\Omega$  i tu też znajduje się jeden wyjątek w postaci stosunku impedancji elementów  $R_3$  i  $R_4$  o modułach 10 k $\Omega$ . Porównując części rzeczywiste otrzymane komparatorem i mostkiem transformatorowym, można stwierdzić dobrą zgodność w granicy kilku ppm. Jedynie wartości stosunku impedancji typu pojemnościowego, które odpowiadają ilorazowi wartości pojemności komparowanych elementów dla częstotliwości 5120 Hz różnią się o 18 ppm. Nieznana jest jeszcze dokładna przyczyna tej rozbież-

ności. Mimo to wyniki wskazują, że są to pomiary o dużej dokładności.

## 5. Błędy i niepewność pomiaru

Główne błędy pomiaru są związane z niestałością napięcia zasilania przy obydwu przełączeniach kontaktów, czyli przy pomiarze napięć  $\underline{U}_{V2}'$ ,  $\underline{U}_{V2}''$ . Przykładowy przebieg części rzeczywistej stosunku napięć dla tego samego napięcia z generatora podanego na wejście modułu przedstawiony jest na rys. 2.



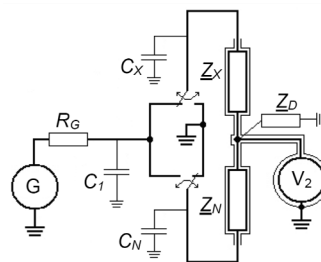
Rys. 2. Przebieg części rzeczywistej stosunku napięć dla tego samego sygnału podanego na wejście modułu. Parametry doświadczenia: cz. prób. 250 kHz, cz. syg. 625 Hz, czas pomiaru poszczególnych napięć 1 s, amplituda sygnału 1 Vpp

Fig. 2. Experimental results of the CVR real part gathered at the generator output. The measurement parameters were: sampling freq. 250 kHz, signal freq. 625 Hz, time of each voltage measurement was 1 s and signal amplitude 1 Vpp

Na rys. 2 kolejne punkty pomiarowe połączono prostymi w celu lepszej widoczności. Wartości należy odczytywać dla całkowitych wartości znajdujących się w osi OX, która reprezentuje numery kolejnych pomiarów wykonywanych w dwusekundowych odcinkach czasu. Wartość średnia sygnału na rys. 2 wynosi 1, a jej rozrzut (wariancja) z tej jednej serii to 2 ppm. Wartość średnia części urojonej (nie pokazanej) stosunku napięć wynosi  $2 \cdot 10^{-7}$ , a jej rozrzut  $5 \cdot 10^{-7}$ .

Jak widać stosunek napięć w kolejnych pomiarach zmienia się na wyjściu generatora w granicy kilku ppm, a średnia dąży do wartości 1 w przeciągu 40 sekund. Zostanie przyjęte, że stosunek napięć na wyjściu generatora jest stały i nie będzie mierzony, jednak wpływ jego przebiegu na pomiar stosunku impedancji jest ciekawym tematem do analizy.

Bardzo istotną rzeczą wpływającą na dokładność pomiaru stosunku impedancji jest impedancja wyjściowa generatora i pojemności przewodów doprowadzających napięcie generatora. Na rys. 3 przedstawiono schemat zastępczy komparatora, o parametrach skupionych, uwzględniający impedancję wyjściową generatora i pojemności przewodów łączących.



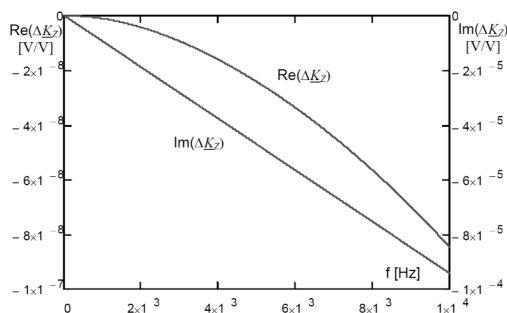
Rys. 3. Schemat zastępczy komparatora uwzględniający rezystancję wyjściową generatora i pojemności przewodów doprowadzających

Fig. 3. Schematic diagram of the comparator involving the generator output resistance and capacitances of input lead cables

Należy wspomnieć, że to nie są wszystkie szkodliwe impedancje występujące w komparatorze. Istnieją jeszcze impedancje szeregowo przewodów łączących typu rezystancyjnego i indukcyjnościowego, które ograniczają dokładność pomiaru.

W zakładanym zakresie wartości mierzonych impedancji i częstotliwości założono, że wpływ ten jest pomijalny na dokładność pomiaru stosunku impedancji.

Na rys. 4 przedstawiony jest wyznaczony symulacyjnie wykres błędu komparacji typu R-R w zależności od częstotliwości dla następujących parametrów:  $C_I=60$  pF,  $C_X=50$  pF,  $C_N=70$  pF,  $R_G=50$   $\Omega$ ,  $Z_D=10$  G $\Omega$ /500 pF. Pojemność  $C_I$  typową dla 0,5 m przewodu koncentrycznego. Pojemności  $C_X$ ,  $C_N$  zależą od przewodów doprowadzających, ale także od komparowanych elementów. Impedancja wyjściowa generatora ma wartość taką jaką podaje producent. Na impedancję  $Z_D$  składa się wiele elementów komparatora [2]. Błąd  $\Delta K_Z$  na rys. 4 jest to różnica między stosunkiem impedancji obliczonym dla układu, gdy  $R_G=0$  i wtedy pojemności  $C_I$ ,  $C_X$ ,  $C_N$  nie mają wpływu oraz między stosunkiem impedancji obliczonym dla układu z uwzględnieniem tych parametrów o wartościach przedstawionych wyżej.



Rys. 4. Symulacja błędu części rzeczywistej i urojonej komparacji typu R-R (100k $\Omega$ -100k $\Omega$ ) w funkcji częstotliwości dla parametrów układu podanych w tekście

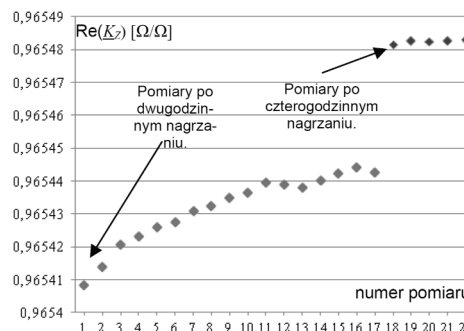
Fig. 4. Simulation results of the real and imaginary part of the error of R-R type comparison (100k $\Omega$ -100k $\Omega$ ) caused by input parasitic impedances vs. frequency

Na rys. 4 widać w jaki sposób błędy komparacji typu R-R rosną wraz ze wzrostem częstotliwości. Bardzo podobnie przedstawia się wykres dla komparacji typu C-C (nie pokazany). Dla komparacji typu R-C błędy są duże w porównaniu z komparacjami impedancji tego samego typu. Dlatego też, dla komparacji typu R-C powinno się położyć nacisk na minimalizację impedancji wyjściowej generatora. Należy jeszcze wspomnieć, że wyznaczony komparatorem stosunek typu C-C z tabeli 1 jest dokładny, ponieważ iloraz dwóch komparacji redukuje pewne błędy, szczególnie dla stosunków typu R-C.

Oczywistym źródłem niepewności pomiaru jest zespolony stosunek napięć. Minimalizuje się go poprzez synchronizację przebiegu generowanego i układu próbkującego. Wtedy licząc wartość amplitudy i fazy przebiegu na podstawie próbek przy pomocy algorytmu DFT bardzo dokładnie jest znany stosunek częstotliwości sygnału do częstotliwości próbkowania, co daje dokładniejsze wyniki. Częstotliwość próbkowania powinna być jak największa i tak dobrana by zapewnić całkowitą liczbę próbek na okres, aby uniknąć zjawiska aliasingu i przecieku widma [3]. Błąd kwantyzacji lub inaczej rozdzielczość przetwornika powinna być jak największa w celu zapewnienia jak najmniejszej niepewności pomiaru. Przy wyznaczaniu stosunku napięć ważna jest liniowość charakterystyki przetwornika. Przy wyznaczaniu stosunku napięć o takim samym module nieliniowości przetwornika nie mają wpływu na moduł stosunku napięć. W przypadku wysokich nieliniowości może być wskazana korekcja charakterystyki przetwornika [10].

Dokładność pomiaru może ograniczać także sygnał generowany i pojemność cieplna elementów komparowanych. Sygnał powinien cechować się dobrą stabilnością częstotliwościową szczególnie dla komparacji typu R-C, gdzie impedancja elementu pojemnościowego zależy od częstotliwości. Na rys. 5 przedstawiono wartości stosunku impedancji zmierzone podczas nagrzewania w termostacie. Jasnymi punktami zaznaczono 17 pomiarów wy-

konanych po czasie dwóch godzin i kolorem ciemniejszym zaznaczono pomiary wykonane po czterech godzinach nagrzewu. Jak widać powtarzalność pomiarów w granicy 1 ppm była możliwa dopiero po 4 godzinach nagrzewania elementów co jest spowodowane dużą pojemnością cieplną kondensatorów wzorcowych. Wykorzystywane rezystory wzorcowe cienkowarstwowe nagrzewają się szybciej.



Rys. 5. Część rzeczywista stosunku impedancji typu R-C (100 k $\Omega$  - 3 nF) w funkcji czasu dla nastawy częstotliwości równej 512 Hz

Fig. 5. The real part of the R-C type element impedance ratio (100 k $\Omega$  - 3 nF) vs. time for frequency 512 Hz. The brighter points are the results gathered after 2 hours of warming up and darker are the results after 4 hours

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę komparacji impedancji różnego typu w nowym układzie. Wyniki badań ukazują możliwość osiągnięcia dokładności na poziomie kilku ppm dla porównywanych impedancji o zbliżonych modułach typu R-R, C-C i R-C. Analiza błędów systematycznych i niepewności pomiaru są przedmiotem dalszych badań.

## 7. Literatura

- [1] Kontorski K.: Pomiary komparatorowe stosunku impedancji wzorcowych różnego typu, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 01, 2013, s. 6-8.
- [2] Rybski R., Kontorski K.: Ocena wpływu impedancji pasozytniczych na dokładność cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 2, 2011.
- [3] Kaczmarek J., Rybski R.: Mostek niezrównoważony do dokładnych pomiarów pojemności, Pomiary Automatyka Robotyka, nr 7-8, 2004.
- [4] Ramm G., Moser H.: New multifrequency method for the determination of the dissipation factor of capacitors and of the time constant of resistors, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, no. 2, April 2005.
- [5] Overney F., Jeanneret B.: RLC Bridge Based on an Automated Synchronous Sampling System, IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. 60, No. 7, 2011.
- [6] Delahaye F., Goebel R.: Evaluation of the Frequency Dependence of the Resistance and Capacitance Standards in the BIPM Quadrature Bridge, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, no. 2, 2005.
- [7] Schurr J., Wood B. M., Overney F.: Linear Frequency Dependence in AC Resistance Measurement, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, no. 2, 2005.
- [8] Waltrip B. C., Oldham N. M.: Digital Impedance Bridge, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, no. 2, April 1995.
- [9] Dudziewicz J. (red.): Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1982.
- [10] Vora C. S., Satish L.: ADC Static Nonlinearity Estimation Using Linearity Property of Sinewave, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 60, no. 4, April 2011.

otrzymano / received: 15.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper