

Kamil KONTORSKI

UNIWERSTYTET ZIELONOGÓRSKI, INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ,
ul. Ogrodowa 3b, 65-462 Zielona Góra

Pomiary komparatorowe stosunku impedancji wzorcowych różnego typu

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 przedstawiony jest układ komparatora do wyznaczania stosunku impedancji dwuportowych, współosiowych w zakresie (10 – 100) kΩ, typu R-R, C-C, a także R-C. Główne elementy układu to generator, transformator pomiarowy i cyfrowy moduł pomiarowy. Przeprowadzono badania w celu pewnego porównania wyników otrzymanych komparatorem z tymi otrzymanymi klasycznym mostkiem transformatorowym. Dokonano analizy błędów występujących w systemie pomiarowym.

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

Measurements of different type standard impedance ratio with digital comparator**Abstract**

In the paper a comparator circuit which measures two terminal-pair impedance ratio is presented. The system is able to compare impedances of R-C type elements but with indirect comparison it is possible to achieve impedance ratio of R-R and C-C type elements. The first section describes the principle of operation of the impedance bridge and comparator. The system setup and the measurement method are presented in the second section. In Fig. 1 there are shown: a digital generator G, a measurement transformer Tr, the compared impedances Z_X , Z_Y , a digital sampling voltmeter with channels V_1 , V_2 and a buffer amplifier B. Stray impedances are depicted as Z_D and they affect mostly the unbalance voltage [2]. The CVR (complex voltage ratio) is gathered when the secondary voltages are in phase and when they are in reversed phase (180°). Equation (8) describes the relation between the measured CVRs and the impedance ratio. Table 1 contains the measurement results of the CVR at the transformer output in the circuit with different impedances. It is assumed that the voltage ratios at the transformer output are equal to 1 and -1, respectively. The experimental results are listed in Table 2. There were compared two standard resistors (R_1 , R_2) of nominal values equal to 100 kΩ, two resistors (R_3 , R_4) of 10 kΩ and two capacitors (C_1 , C_2) of 3 nF. The resulting indirect ratio of C_1 , C_2 and R_1 , R_2 is compared with the direct result from a transformer bridge. The results are contained in the range of ± 5 ppm. The fifth section describes shortly sources of the uncertainty in the system.

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

1. Wstęp

Znajomość dokładnej wartości impedancji w zakresie (10 – 100) kΩ jest potrzebna w wielu dziedzinach nauki i techniki. Przykładem może być precyzyjny pomiar małych prądów, gdzie na dokładność wpływa wartość impedancji bocznikującej.

Impedancja elektryczna nie jest mierzona bezpośrednio, lecz poprzez pomiar spadku napięcia i płynącego przez nią prądu. Układy mostkowe pozwalają na wyznaczenie stosunku impedancji mierzonej i wzorcowej poprzez pomiar spadków napięcia na tych elementach. Gdy mostek jest zrównoważony to prąd przepływający przez porównywane impedancje jest w przybliżeniu taki sam.

W takiej sytuacji iloraz spadków napięcia na porównywanych elementach odpowiada ilorazowi ich wartości. Równoważenie mostka przebiega różnie w zależności od jego konstrukcji. Jeżeli układ ma stały potencjał odniesienia to równowaga jest osiągnięta przez doprowadzenie dwóch punktów tworzących przekątną pomiarową do wartości tego potencjału [6]. Elementami nastawnymi w układzie mogą być np. indukcyjne dzielniki napięcia, kondensatory dekadowe lub generatory napięcia o dużej rozdzielczości. Stan nierównoważenia jest mierzony np. nanowoltomierzem z detekcją synchroniczną.

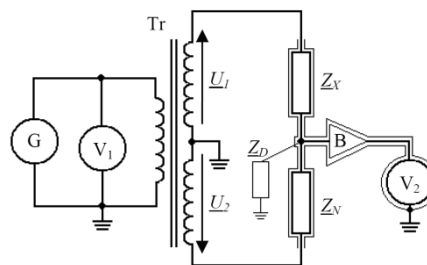
Najdokładniejsze obecnie stosowane układy do pomiaru impedancji to mostki transformatorowe. Zasilane są z jednego generatora poprzez transformator i posiadają dużo elementów nastawnych o silnym sprzężeniu magnetycznym.

Rozwój techniki cyfrowej pozwolił na konstrukcję prostszych układów do pomiaru stosunku impedancji. Tego typu komparator, który wykorzystuje dwa cyfrowe generatory jako elementy zasilające i równoważące układ, opisany jest w [2, 5].

W artykule autor zaprezentował układ do pomiaru stosunku impedancji różnego typu na podstawie komparacji impedancji elementów typu pojemnościowego i rezystancyjnego. Układ komparatora jest wynikiem prac autora nad nierównoważonymi układami cyfrowymi tego typu.

2. Układ pomiarowy i metoda pomiaru

Ideowy schemat układu pomiarowego jest przedstawiony na rys. 1. Przy jego omawianiu będą podawane nazwy rzeczywistych elementów z układu doświadczalnego.



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

Napięcie generatora cyfrowego G (HP33120A) zasilą układ pomiarowy. Transformator pomiarowy posiada odczep dokładnie w połowie uzwojenia wtórnego i przełącznik odwracania fazy o 180 stopni. Jest to element, którego uzwojenia wtórne są silnie sprzężone magnetycznie. Transformator jest zamknięty w metalowej obudowie w celu zmniejszenia zakłóceń elektromagnetycznych. Napięcia wtórne U_1 i U_2 odtwarzają zespolony stosunek napięć K_U i są sobie równe z dużą dokładnością dla napięć będących w fazie. Impedancje mierzone Z_X i impedancja wzorcową Z_Y 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 pasozytnicze opisano w [1]. Na rys. 1 nie przedstawiono wszystkich impedancji pasozytniczych, gdyż dla wartości komparowanych impedancji i częstotliwości pomiarowej mają one pomijalny wpływ na stosunek impedancji. Teoretycznie w omawianej metodzie pomiarowej wpływ wartości impedancji Z_D jest także pomijalny na wynik komparacji. Został on dodany, ponieważ jest to element pasozytniczy mający silny wpływ na wartość napięcia nierównoważenia. Napięcia w układzie są mierzone za pomocą modułu cyfrowego (NI USB-6211) sterowanego poprzez magistralę USB. Moduł posiada jeden 16-bitowy przetwornik A/C i wbudowany multi-

plekser do przełączania kanałów. W przekątnej pomiarowej występuje bufor B (AD1830) zmniejszający impedancję wejściową modułu. W układzie występuje synchronizacja między napięciem generowanym, a pobieranymi próbkami napięcia co zapewnia dużą dokładność pomiaru amplitudy i fazy sygnału [2]. Wszystkie przewody i elementy układu są ekranowane od wpływu sygnałów o wyższych częstotliwościach, a potencjały ekranów mają wartość potencjału odniesienia.

Metoda pomiaru stosunku impedancji polega na podwójnym pomiarze zespolonego stosunku napięć. Pierwszy z nich to iloraz napięcia na wyjściu generatora \underline{U}_{V1}' mierzonego przez kanał V_1 modułu i napięcia w przekątnej pomiarowej \underline{U}_{V2}' mierzonego przez kanał V_2 modułu przy napięciach wtórnych będących w fazie. Pomiar drugiego stosunku napięć jest związany z pomiarem napięcia \underline{U}_{V2}'' kanałem V_2 i napięcia \underline{U}_{V1}'' kanałem V_1 , gdy kąt fazowy napięcia \underline{U}_1 jest odwrócony o 180° . Gdy napięcia na wyjściu transformatora są w fazie to ich stosunek, oznaczany przez \underline{K}_{U1} , jest z dużą dokładnością równy 1, bez względu na rodzaj obciążenia (więcej w rozdziale 4). Jednak stosunek napięć wtórnych, oznaczany przez \underline{K}_{U2} , nie zawsze równa się jedności, gdy napięcia te są w przeciwfazie. W dalszych rozważaniach przyjęte zostało, że stosunek $\underline{K}_{U1}=1$, a $\underline{K}_{U2}=-1$. Jak się okaże badania doświadczalne dają całkiem poprawne wyniki mimo tego uproszczenia.

Próbkowanie napięć odbywa się dla częstotliwości maksymalnej (250 kHz) i dla sygnału pomiarowego 500 Hz. Przy przełączaniu kanału należy kilka próbek pominąć z zebranego ciągu. Przykład takiego postępowania jest przedstawiony w [3]. Amplituda i faza każdego sygnału jest liczona za pomocą algorytmu DFT. Należy dobrać taki czas pomiaru aby otrzymać jak najstabilniejsze kolejne wyniki pomiarów. W przypadku układu badanego przez autora jeden pomiar stosunku napięć $\underline{U}_{V2}'/\underline{U}_{V1}'$ trwał około 4 minuty.

3. Wyznaczanie stosunku impedancji

Poniżej zostanie omówiony sposób wyznaczenia stosunku impedancji na podstawie zmierzonych wcześniej stosunków napięć. Założenia poprzedniego rozdziału są istotne także tutaj. Równanie napięć w układzie przedstawionym na rys. 1 można zapisać, jako:

$$\underline{U}_D = \underline{U}_1 \frac{\underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X + \underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D} + \underline{U}_2 \frac{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D + \underline{Z}_N}, \quad (1)$$

gdzie: \underline{U}_D – napięcie niezrównoważenia w przekątnej pomiarowej, $\underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D$ – równoległe połączenie impedancji wzorcowej i zastępczej impedancji pasożytniczej.

Wprowadzone zostaną pewne oznaczenia. Względne napięcie niezrównoważenia dla stanu, gdy napięcia wtórne są w fazie będzie oznaczane jako $\underline{U}_{D1,r} = \underline{U}_{D1}/\underline{U}_2$. Względny napięciem niezrównoważenia dla stanu, gdy napięcia wtórne są w przeciwfazie będzie oznaczane jako $\underline{U}_{D2,r} = \underline{U}_{D2}/\underline{U}_2$. Uwzględniając powyższe i wyrażenie $\underline{K}_U = \underline{U}_1/\underline{U}_2$ wzór (1) można zapisać, jako:

$$\underline{U}_{D1,r} = \underline{K}_{U1}a + b, \quad \underline{U}_{D2,r} = \underline{K}_{U2}a + b, \quad (2)$$

gdzie:

$$a = \frac{\underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X + \underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}, \quad b = \frac{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X \parallel \underline{Z}_D + \underline{Z}_N}, \quad (3)$$

\underline{K}_{U1} , \underline{K}_{U2} - stosunek napięć na uzwojeniach wtórnych odpowiednio w pierwszym i w drugim pomiarze.

Równania (2) to odwzorowania liniowe w przestrzeni liczb zespolonych. Obliczając na ich podstawie wartości współczynników a i b (3) wyznaczone zostanie równanie, z którego można obliczyć wartość \underline{K}_U dla dowolnego napięcia $\underline{U}_{D,r}$. Wartości tych współczynników wyrażają się zależnościami:

$$a = \frac{\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r}}{\underline{K}_{U1} - \underline{K}_{U2}}, \quad b = \frac{\underline{K}_{U1}\underline{U}_{D2,r} - \underline{K}_{U2}\underline{U}_{D1,r}}{\underline{K}_{U1} - \underline{K}_{U2}}. \quad (4)$$

Wartość stosunku napięć odpowiadająca wartości napięcia $\underline{U}_{D,r}$ równej 0 wynosi:

$$\underline{K}_U = -\frac{b}{a} = -\frac{\underline{K}_{U1}\underline{U}_{D2,r} - \underline{K}_{U2}\underline{U}_{D1,r}}{\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r}}. \quad (5)$$

Uwzględniając, że nominalnie $\underline{K}_{U1} = 1$ i $\underline{K}_{U2} = -1$, po podstawieniu do równania (5) otrzymuje się:

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

Wzór (6) odpowiada stosunkowi napięć w przypadku, gdy napięcie w przekątnej pomiarowej wynosi 0 V. Z tego wynika, iż stosunek napięć z powyższego wzoru odpowiada stosunkowi impedancji porównywanych.

Równanie (6) jest równoważne wyrażeniu:

$$\underline{K}_U = -\frac{\frac{\underline{U}_{D1}}{\underline{U}_2} + \frac{\underline{U}_{D2}}{\underline{U}_2}}{\frac{\underline{U}_{D1}}{\underline{U}_2} - \frac{\underline{U}_{D2}}{\underline{U}_2}}. \quad (7)$$

Wykonane pomiary napięć \underline{U}_{V2}' , \underline{U}_{V2}'' odpowiadają napięciom \underline{U}_{D1} , \underline{U}_{D2} . Wartości napięć \underline{U}_{V1}' , \underline{U}_{V1}'' mierzone na wyjściu generatora są proporcjonalne do napięcia \underline{U}_2 , a współczynnikiem proporcjonalności jest przekładnia transformatora. Dlatego wyrażenie (8):

$$\underline{K}_U = -\frac{\frac{\underline{U}_{V2}'}{\underline{U}_{V1}'} + \frac{\underline{U}_{V2}''}{\underline{U}_{V1}''}}{\frac{\underline{U}_{V2}'}{\underline{U}_{V1}'} - \frac{\underline{U}_{V2}''}{\underline{U}_{V1}''}} \quad (8)$$

jest równoważne wyrażeniu (7) przy przyjętych wcześniej założeniach upraszczających.

W mianowniku (6) występuje różnica mierzonych wartości. Aby poznać kiedy ta różnica równa się 0 należy skorzystać z równań (2) i założenia, że stosunek napięć na wyjściu transformatora $\underline{K}_{U1} = -\underline{K}_{U2} = 1$. Otrzymuje się wtedy:

$$\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r} = 2\underline{K}_{U1}a = 2\frac{\underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}{\underline{Z}_X + \underline{Z}_N \parallel \underline{Z}_D}. \quad (9)$$

Wartość we wzorze (9) jest bliska 0, gdy impedancja \underline{Z}_N jest znacznie mniejsza od \underline{Z}_X .

4. Weryfikacja pomiarowa

Pierwsze doświadczenie polegało na zmierzeniu wartości stosunku napięć na uzwojeniach wtórnych w zależności od wartości i rodzaju komparowanych elementów impedancyjnych. W tab. 1 zamieszczono wyniki pomiarów. W pierwszej kolumnie przedstawiono rodzaj impedancji i ich wartości, które są podłączone do uzwojeń wtórnych transformatora. Druga kolumna zawiera zmierzone za pomocą modułu przy częstotliwości 500 Hz stosunki napięć na tych uzwojeniach, gdy napięcia na ich wyjściu są w fazie i w kolumnie trzeciej, gdy są w przeciwfazie. Można stwierdzić, że dla napięć w fazie stosunek napięć jest równy założonej wartości 1, ale dla przypadku, gdy \underline{U}_1 i \underline{U}_2 są w przeciwfazie wartość części rzeczywistej nieco odbiega od wartości -1, a wartość części urojonej odbiega nieco od wartości 0. Pierwsze trzy wiersze z wynikami nie są istotne dla badanego komparatora, gdyż służy on tylko do porównań typu R-C. W ostatnim wierszu widać ciekawostkę, a mianowicie mimo niesymetrycznego obciążenia i różnego typu podłączonych elementów impedancyjnych stosu-

nek napięć w obydwu przypadkach ma najlepszą zgodność względem poprzednich wyników pomiaru.

Tab. 1. Wyniki pomiarów stosunku napięć na wyjściu transformatora
Tab. 1. Measurement results of the complex voltage ratio at the transformer output

Rodzaj obciążenia oraz wartości	Wynik pomiaru stosunku napięć dla kąta 0 stopni (Re, Im) [V/V] ¹⁾	Wynik pomiaru stosunku napięć dla kąta 180 stopni (Re, Im) [V/V] ¹⁾
(R-R) 10 kΩ – 10 kΩ (1:1)	1.000000, 0.000000	-1.000008, 0.000020
(R-R) 100 kΩ – 100 kΩ (1:1)	1.000000, 0.000001	-1.000006, 0.000017
(R-R) 100 kΩ – 10 kΩ (10:1)	1.000000, 0.000000	-1.000002, 0.000009
(R-C) 100 kΩ – 3 nF (1:1)	1.000000, 0.000000	-0.999990, 0.000012
(R-C) 10 kΩ – 3 nF (1:10)	1.000000, 0.000000	-1.000000, 0.000005

¹⁾ Niepewność typu A serii pomiarów stosunku napięć wynosiła ± 2 ppm w stosunku do części rzeczywistej i urojonej

Badania doświadczalne miały na celu pewne określenie dokładności wyznaczenia stosunku impedancji przez komparator. W tym celu w tabeli 2 zestawiono wyniki otrzymane za pomocą komparatora i za pomocą klasycznego mostka transformatorowego z binarnymi indukcyjnymi dzielnikami napięcia. W pomiarach 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). Pomiar przeprowadzono przy częstotliwości 500 Hz. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki pomiarów stosunku impedancji
Tab. 2. Measurement results of the impedance ratio

Zapis przeprowadzonej komparacji	Pomiary wykonane komparatorem [Ω/Ω] ²⁾	Mostek trans. [Ω/Ω] ¹⁾
$(R_1/C_1)/(R_2/C_1) = (R_1/R_2)$	$0,000203 + j1,000481$ $0,000197 + j1,0005715 = 0,999910 - j6 \cdot 10^{-6}$	0,999908
$(R_1/C_2)/(R_2/C_2) = (R_1/R_2)$	$0,000195 + j1,001924$ $0,000192 + j1,002020 = 0,999904 - j3 \cdot 10^{-6}$	0,999908
$(R_1/C_1)/(R_1/C_2) = (C_2/C_1)$	$0,000203 + j1,000481$ $0,000195 + j1,001924 = 1,001442 + j9 \cdot 10^{-6}$	1,001445
$(R_2/C_1)/(R_2/C_2) = (C_2/C_1)$	$0,000197 + j1,0005715$ $0,000192 + j1,002020 = 1,001448 + j6 \cdot 10^{-6}$	1,001445
$(R_3/C_1)/(R_4/C_1) = (R_3/R_4)$	$-0,000042 + j0,1001791$ $-0,000044 + j0,1001786 = 1,000004 - 19 \cdot 10^{-6}$	1,000000
$(R_3/C_2)/(R_4/C_2) = (R_3/R_4)$	$-0,0000440 + j0,1003238$ $-0,0000445 + j0,1003238 = 1,000001 - 4 \cdot 10^{-6}$	1,000000
$(R_3/C_1)/(R_3/C_2) = (C_2/C_1)$	$-0,000042 + j0,1001791$ $-0,0000440 + j0,1003238 = 1,001445 + 12 \cdot 10^{-6}$	1,001445
$(R_4/C_1)/(R_4/C_2) = (C_2/C_1)$	$-0,000044 + j0,1001786$ $-0,0000445 + j0,1003238 = 1,001448 - 2 \cdot 10^{-6}$	1,001445

¹⁾ Niepewność pomiaru części rzeczywistej stosunku impedancji zmierzonej mostkiem transformatorowym oszacowano na poziomie ± 2 ppm

²⁾ Niepewność typu A serii pomiarów stosunku impedancji wynosiła ± 5 ppm w stosunku do części rzeczywistej i urojonej

W pierwszej kolumnie zapisane jest wyrażenie określające przeprowadzone komparacje. Przykładowy zapis (R_1/C_1) oznacza, że w układzie komparatora podłączono w miejsce Z_X (na rys. 1) element rezystancyjny R_1 , a w miejsce Z_N element pojemnościowy C_1 o wartościach podanych wyżej. Zapis $(R_1/C_1)/(R_2/C_1) = (R_1/R_2)$ przedstawia iloraz wartości stosunku impedancji elementów R_1 i C_1 przez wartość stosunku impedancji elementów R_2 i C_1 . W wyniku otrzymuje się pośredni wynik stosunku impedancji elementów R_1 i R_2 , który może zostać porównany z stosunkiem impedancji tychże elementów zmierzonym za pomocą mostka transformatorowego. Dla każdej komparacji zastosowano dodatkowo metodę przestawienia polegającą na pomiarze stosunku impedancji elementów R_2 , C_1 i tych samych elementów w pozycji odwrotnej. Z takich dwóch pomiarów liczy się średnią. Pozwala to zredukować pewne błędy pomiaru. Dokładność komparatora można było sprawdzić tylko w odniesieniu do pośrednich wyników komparacji typu R-R i C-C, ponieważ używany mostek transformatorowy cechuje się możliwością pomiaru stosunku wartości impedancji elementów tego samego typu i głównie wartości rzeczywistej tego stosunku. W kolumnie drugiej tab. 2 przedstawione są wyniki poszczególnych komparacji typu R-C otrzymanych komparatorem i wyniki pośrednich komparacji typu R-R lub C-C w zależności od wiersza. Wyniki porównania elementów impedancyjnych są przedstawione wraz z częścią urojoną

dla badanego komparatora. Ich przedstawienie ukazuje pełniejszy obraz możliwości komparatora. W kolumnie 3 przedstawiono wyniki otrzymane za pomocą mostka transformatorowego.

Jak widać wyniki otrzymane komparatorem są bardzo zbliżone do tych otrzymanych mostkiem transformatorowym. Oczywiście stwierdzić to można tylko dla komparacji elementów typu R-R i C-C. Sprawdzenie dokładności komparacji elementów typu R-C, czyli komparacji, którą układ może przeprowadzać bezpośrednio, wymagało by skonstruowania pewnego układu do komparacji tego typu. Można tego dokonać stosując zrównoważone komparatory cyfrowe [4] co jest, jak już wspomniano na wstępie, rozwiązaniem prostszym od klasycznych układów mostków R-C.

5. Źródła błędów pomiaru

Główne źródła błędów pomiaru stosunku impedancji są związane z nierównością stosunku napięć na wyjściu transformatora wartości -1 dla napięć nie będących w fazie, z pomiarem zespolonego stosunku napięć i z powolnymi zmianami parametrów układu podczas pomiaru.

W poprzednim rozdziale zbadano pomiarowo wartość stosunku napięć na wyjściu transformatora w różnych ustawieniach uzwojeń wyjściowych. W celu minimalizacji tego błędu należało by wykorzystać zmierzony stosunek napięć we wzorze (5).

Pomiar napięć, których stosunek jest wyznaczany powinien być wykonywany dla jak największej częstotliwości próbkowania i powinna być ona dobrana tak by pobierać całkowitą liczbę próbek na okres, aby zmniejszyć wpływ zjawisk aliasingu i przecieku widma.

Stabilność parametrów układu pomiarowego, takich jak wartość częstotliwości generatora, dryfty napięć bufora wpływają na czas pomiaru i na powtarzalność wyników pomiaru. Prowadzone są badania nad eliminacją bufora B z rys. 1 i zastąpieniem go przez przełącznik kontaktronowy. Stabilność częstotliwościowa, długookresowa generatora wpływa na wartość komparacji elementów typu R-C dlatego też należy kłaść nacisk na minimalizację tego efektu.

Prowadzone są badania dla szerszego zakresu częstotliwości w nieco innym układzie pomiarowym z wykorzystaniem dwóch cyfrowych modułów próbkujących i wstępnie wyniki są interesujące.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono układ, który umożliwia komparację impedancji typu R-C, ale którym można także otrzymać inne stosunki impedancji. Zaletą układu jest to iż nie trzeba go równoważyć tak jak w klasycznych komparatorach. Doświadczalne wyniki wskazują, że są to pomiary na poziomie dokładności osiągalnym przez obecnie najlepsze cyfrowe układy pomiarowe.

7. Literatura

- [1] Rybski R., Kontorski K.: Ocena wpływu impedancji pasozytniczych na dokładność cyfrowego niezrównoważonego komparatora impedancji. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 2, 2011.
- [2] 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.
- [3] Ramm G., Moser H., Braun A.: A new scheme for generating and measuring active, reactive and apparent power at power frequencies with uncertainties of 2.5×10^{-6} . IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, no. 2, April 1999.
- [4] Overney F., Jeanneret B.: RLC Bridge Based on an Automated Synchronous Sampling System, IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. 60, No. 7, 2011.
- [5] Waltrip B. C., Oldham N. M.: Digital Impedance Bridge, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, no. 2, April 1995.
- [6] Dudziewicz J. (red.): Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1982.

otrzymano / received: 20.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.12.2012

artykuł recenzowany / revised paper