

Krzysztof MUSIOŁ, Andrzej MET, Marian KAMPIK
 INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ,
 ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Badania właściwości metrologicznych cyfrowych źródeł dwufazowych

Dr inż. Krzysztof MUSIOŁ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Studia na kierunku Elektrotechnika, specjalność Automatyka i Metrologia Elektrotechniczna ukończył w roku 2002. Rozpoczął pracę naukową w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki. W roku 2007 na Politechnice Śląskiej w Gliwicach uzyskał tytuł doktora nauk technicznych z dyscypliny elektrotechnika i został zatrudniony na stanowisku adiunkta w ww. Instytucie. Zainteresowania naukowe dotyczą precyzyjnych układów do pomiarów składowych impedancji.

e-mail: krzysztof.musiol@polsl.pl



Dr hab. inż. Marian KAMPIK

Profesor nadzwyczajny w Instytucie Metrologii Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Autor lub współautor ponad 100 publikacji naukowo-technicznych, w tym trzech monografii. Jego zainteresowania naukowe obejmują dokładne pomiary wielkości elektrycznych, sensorykę oraz zagadnienia związane z cyfrową syntezą sygnałów pomiarowych.

e-mail: marian.kampik@gmail.com



Dr inż. Andrzej MET

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stopnie magistra i doktora nauk technicznych uzyskał odpowiednio w roku 1976 i 1986. Zainteresowania naukowe dotyczą precyzyjnych przyrządów pomiarowych do pomiarów składowych impedancji, transformatorów wzorcowych z elektroniczną kompensacją błędów, mostków transformatorowych, elektronicznych detektorów napięcia stałego i zmiennego, cyfrowych układów autokompensacji, a także cyfrowego przetwarzania sygnałów.

e-mail: andrzej.met@polsl.pl



Streszczenie

W pracy zostały przedstawione wyniki badań właściwości metrologicznych dwu wybranych komercyjnie cyfrowych dwufazowych źródeł napięcia przemiennego. Badania były prowadzone pod kątem wykorzystania tych źródeł w precyzyjnych układach służących do komparacji impedancji. Otrzymane wyniki badań wzajemnej stabilności amplitud i stabilności fazy poddanych analizie źródeł potwierdzają, iż realne jest uzyskanie niepewności komparacji wzorców impedancji na poziomie 10^{-5} zarówno przy wykorzystaniu w układzie generatora Tabor Electronics WW2572A, jak i źródła Audio Precision AP SYS-2722.

Słowa kluczowe: cyfrowe źródła napięcia przemiennego, komparacja impedancji, źródła dwufazowe.

Metrological properties of digital two-phase voltage sources

Abstract

Metrological properties of commercially available digital two-phase generators are considered in the paper. Two sinewave sources: Tabor Electronics WW2572A and Audio Precision AP SYS-2722 were examined for use in high-precision impedance comparison bridges. The relative stability of the output voltage amplitudes was tested in the measuring circuit shown in Fig. 4. All measurements were made in an electromagnetically screened room shown in Fig. 3. The results obtained (Figs. 5 and 6) prove the short-term magnitude stability of the WW2572A on the level of $15 \mu\text{V/V}$ and the stability of the AP SYS-2722 better than $10 \mu\text{V/V}$. The phase shift stability was checked with use of a lock-in amplifier Stanford Research System SR830. The measurements were taken for four different phase shifts $\Delta\varphi = \varphi_{\text{CH1}} - \varphi_{\text{CH2}}$: 0, -90° , $+90^\circ$, 180° between the output voltages of Channel 1 and 2. The test results presented in Figs. 7 and 8 show that the relative short-term phase stability is equal to 4 mrad for the WW2572A and 6 mrad for the AP SYS-2722. Total Harmonic Distortion factors of the sinewaves generated by the examined sources were also checked. THD on the level of -100 dB proves very high signal purity. The results of the relative amplitude and phase stability measurements prove that it is possible to obtain the uncertainty of impedance comparison on 10^{-5} level using the WW2572A or AP SYS-2722 generator in the comparator bridge shown in Fig. 1.

Keywords: digital AC voltage sources, impedance comparison, two-phase generator.

1. Wstęp

W Krajowych Instytutach Metrologicznych na całym świecie do dokładnych pomiarów impedancji stosowane są niemal wyłącznie metody bezpośredniego porównania ze wzorcem [1, 2]. W klasycznym komparatorze impedancji, złożonym z dwóch źródeł napięcia i dwóch porównywanych impedancji stosunek impedancji badanej i wzorcowej jest określony bezpośrednio przez stosunek napięć na zaciskach źródeł [3]. Brak technicznej możliwości realizacji dokładnych źródeł napięcia powodował, że w ich miejsce wprowadzano elementy impedancyjne lub stosowano elementy o silnym sprzężeniu magnetycznym. Układ do pomiaru impedancji z elementami o silnym sprzężeniu magnetycznym nazywany jest mostkiem transformatorowym [4].

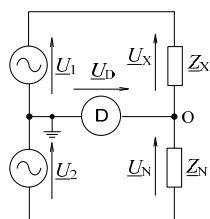
Powrót do idei komparatora impedancji w jego podstawowej konfiguracji (z dwoma źródłami napięcia) stał się możliwy w ostatnich latach, gdy do generacji sygnałów sinusoidalnych zaczęto stosować metodę cyfrowej syntezy częstotliwości, nazywaną również bezpośrednią syntezą cyfrową (ang. *Direct Digital Synthesis*, DDS). Oparte na tej metodzie cyfrowe źródła napięcia mają szereg zalet w porównaniu z klasycznymi analogowymi źródłami napięcia sinusoidalnego. Charakteryzują się one m.in. dużą rozdzielczością nastawy amplitudy i fazy, a także bardzo dobrą stabilnością amplitudy i częstotliwości [5, 6] oraz fazy [4]. Osiągnięty poziom rozwoju komercyjnych generatorów DDS nie pozwala jeszcze na użycie ich jako skalibrowanych źródeł przy komparacjach o najwyższych dokładnościach. Możliwe jest jednak zbudowanie układów lub metod pozwalających na bardzo dokładny pomiar stosunków napięć generowanych przez cyfrowe dwufazowe źródła napięcia. Do metod tych można zaliczyć metodę trzech woltomierzy [1] i metodę bezpośredniego pomiaru zespolonego stosunku napięć przy użyciu woltomierza próbkującego [7].

Z punktu widzenia przydatności generatora dwufazowego do budowy układu komparacji impedancji najistotniejszymi parametrami źródła są:

- 1) krótkoczasowa stabilność amplitudy i fazy,
- 2) rozdzielczość nastawy amplitudy i fazy.

Analizując układ ze skalibrowanymi źródłami napięcia przemiennego przedstawiony na rys.1 łatwo zauważyć, że w granicznym przypadku przy porównywaniu impedancji o zbliżonych wartościach modułów i zastosowaniu metody przestawienia błęd komparacji zależy od krótkoterminowej stabilności amplitudy i fazy generowanych napięć. Wynika to wprost z warunku równowagi układu, kiedy to stosunek impedancji odpowiada zespolonemu stosunkowi napięć. Krótkoterminową stabilność należy tutaj rozumieć jako stabilność źródeł w czasie pozwalającym na przeprowadzenie całego procesu komparacji wzorców. Zważywszy na to, że proces ten jest związany z równoważeniem amplitudowo-fazowym i zazwyczaj kilkudziesięcioma pomiarami napięć (które dopiero po uśrednieniu pozwalają wyznaczyć wartość impedancji mierzonej), komparacja wzorców może trwać nawet kilkadziesiąt

minut. W przeprowadzonych w pracy badaniach przyjęto zatem jednogodzinny przedział badań krótkoterminowej stabilności generatorów.



Rys. 1. Komparator z kalibrowanymi źródłami
Fig. 1. The comparator bridge with calibrated AC sources

Rozdzielczość amplitudy i fazy generatora dwufazowego ma istotne znaczenie dla spełnienia warunków równowagi układu z dokładnością wynikającą z założonej niepewności komparacji impedancji. Teoretycznie wyznaczenie składowych impedancji z niepewnością $10 \mu\Omega/\Omega$ wymaga rozdzielczości nastawy stosunku amplitud na poziomie $1 \cdot 10^{-5}$ i nastawy rozdzielczości fazy na poziomie $10 \mu\text{rad}$. Wymagań tych nie spełnia nawet najwyższej klasy wzorzec fazy Clarke-Hess 5500-2. W praktyce w Krajowych Instytutach Metrologicznych wyznacza się zazwyczaj tylko dominującą składową impedancji wzorca, czyli tę związaną z nazwą wzorca. Nawet jeśli w Krajowym Instytucie Metrologicznym wyznaczane są obie składowe, to niepewność komparacji podawana jest tylko dla składowej dominującej i tylko dla tej składowej wykonuje się komparacje międzylaboratoryjne lub tzw. porównania kluczowe (nadzorowane przez BIPM), będące podstawą do wnioskowania o kompetencjach danego ośrodka metrologicznego.

W celu oszacowania wpływu ograniczonej rozdzielczości fazy źródła dwufazowego rozważmy komparację dwóch idealnych rezystorów o wartościach rzeczywistych równych $1 \text{ k}\Omega$. Wyniki symulacji wykonanej w środowisku LTSpice przedstawione na rys. 2 świadczą o tym, iż w wyniku niedostatecznej rozdzielczości fazy (równej 1 mrad) na przekątnej mostka pojawia się napięcie o wartości skutecznej równej około $8,7 \mu\text{V}$. W wyniku pomiaru wartości skutecznych i przesunięcia fazowego napięć na źródłach otrzymuje się w zespolony stosunek impedancji:

$$Z_X/R_N = 1e^{j0,001}. \quad (1)$$

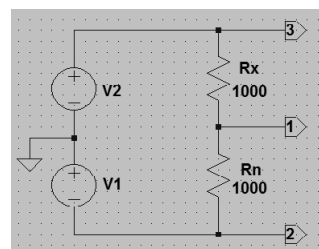
Zatem wyznaczona podczas komparacji wartość rezystancji:

$$R_X = \text{Re}\{Z_X\} = 999,9999998 \Omega, \quad (2)$$

różni się od wartości rzeczywistej jedynie o $0,2 \mu\Omega$. Daje to błąd komparacji na poziomie 10^{-9} .

Warto podkreślić, iż zastosowanie odpowiedniego detektora fazowego (np. Stanford Research System SR830) pozwala wyznaczyć stosunek impedancji z zakładaną wyżej niepewnością $10 \mu\Omega/\Omega$ nawet w sytuacji, gdy rozdzielczość użytych generatorów nie pozwala na osiągnięcie stanu równowagi układu. Wówczas odpowiednio dokładny pomiar składowych napięć nierównowagi wraz z pomiarami amplitud i przesunięcia fazowego napięć źródła dwufazowego pozwala osiągnąć założoną niepewność komparacji. Niezwykle istotna jest w tym przypadku stabilność napięcia nierównowagi, na którą wpływa przede wszystkim wzajemna stabilność amplitud i faz użytego generatora dwufazowego.

Aktualny stan techniki pozwala sądzić, że stabilność stosunku amplitud komercyjnych cyfrowych źródeł napięcia przemiennego jest na poziomie lepszym niż $1 \cdot 10^{-5}$, a stabilność fazy na poziomie 1 mrad (dzięki zastosowaniu w generatorach DDS metody synchronicznego wyzwalania zboczy sygnałów na obu kanałach). Pozwala to na zmniejszenie błędu komparacji do kilkudziesięciu $\mu\Omega/\Omega$.



--- AC Analysis ---		
frequency:	1000 Hz	
V(2):mag:	1 V	phase: -180°
V(1):mag:	8.72665e-006 V	phase: 90.0005°
V(3):mag:	1 V	phase: 0.001°

Rys. 2. Symulacja komparacji idealnych rezystorów w programie LTSpice
Fig. 2. Simulation of comparison of ideal resistors in LTSpice

2. Stanowisko badawcze

W precyzyjnych pomiarach wielkości elektrycznych, a szczególnie w dokładnych pomiarach napięć przemiennych niezwykle ważne jest stworzenie odpowiednich warunków środowiskowych do badań. Szczególnie istotne jest, aby w otoczeniu stanowiska pomiarowego nie znajdowały się źródła zakłóceń, które spowodują wyindukowanie się niepożądanych napięć w układzie pomiarowym. Aby uniknąć wpływu zaburzeń promieniowanych na wyniki badań wszystkie pomiary wykonywane są w ekranowanym pomieszczeniu Laboratorium Dokładnych Pomiarów Elektrycznych Instytutu Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej (rys. 3). Usytuowanie laboratorium w podziemiach i wykorzystanie układu klimatyzacji gwarantuje stabilizację temperatury na poziomie $0,5^\circ\text{C}$.



Rys. 3. Wygląd stanowiska badawczego w pomieszczeniu ekranowanym
Fig. 3. Research station in the electromagnetically screened room

Głównymi elementami stanowiska badawczego są dwa dwufazowe cyfrowe źródła napięcia przemiennego, które w przypadku pozytywnych wyników badań posłużą do budowy układu komparacji wzorców impedancji. Badaniom poddano: generator DDS Tabor Electronics WW2572A i system AudioPrecision SYS-2722 z wbudowanym cyfrowym dwufazowym źródłem napięcia przemiennego. Przyrządy te zostaną obecnie scharakteryzowane.

2.1. Tabor Electronics WW2572A

Tabor Electronics WW2572A jest dwukanałowym generatorem przebiegów klasycznych, programowanych przez użytkownika (arbitralnych), sekwencyjnych i modulowanych o rozdzielczości nastawy amplitudy dla zakresu 1 V równej $10 \mu\text{V}$. Wykorzystanie układu generatora DDS o szybkości odtwarzania próbek 250 MS/s oraz metody synchronicznego wyzwalania zboczy sygnałów w obu kanałach (ang. *Inter-channel phase control*) stwarza możliwość generacji dwóch napięć sinusoidalnych o bardzo dużej stabilności i małym jitterze. Przyrząd umożliwia nastawę fazy przebiegu z rozdzielczością jednej próbki, co w przypadku wykorzystania maksymalnej częstotliwości próbkowania do generacji

przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości $f = 1$ kHz daje rozdzielczość nastawy fazy sięgającą $0,001^\circ$. Pod tym względem generator Tabor nie ustępuje najwyższej klasy wzorcowi fazy Clarke-Hess 5500.

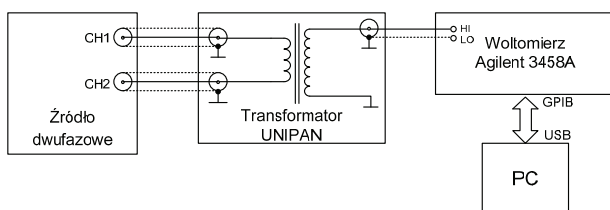
2.2. AudioPrecision SYS-2722

SYS-2722 jest wysokiej klasy rozbudowanym systemem przeznaczonym do generacji i analizy sygnałów audio. Przyrząd wyposażony jest między innymi w cyfrowy dwukanałowy generator przebiegu sinusoidalnego. Próbkę z których odtwarzany jest przebieg są obliczane przez procesor sygnałowy (DSP) i przetwarzanego na postać analogową za pomocą przetworników cyfrowo-analogowych o dużej rozdzielczości. Rozdzielczość nastawy amplitudy dla zakresu 1 V wynosi $10 \mu\text{V}$, a rozdzielczość fazy jest równa $0,01^\circ$.

3. Stabilność krótkoczasowa amplitudy

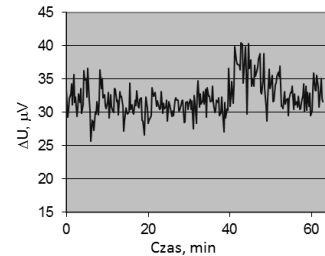
Wyznaczenie wzajemnej stabilności amplitud źródła dwufazowego można sprowadzić do pomiaru bardzo małej różnicy dwóch napięć przemiennych o nominalnie jednakowych amplitudach [8]. Do pomiaru różnicy napięć wykorzystano wysokiej klasy woltomierz próbkujący Agilent 3458A o rozdzielczości $8\frac{1}{2}$ cyfry, który charakteryzuje się szumami własnymi na poziomie $20 \mu\text{V}$. W przypadku komparatora ze źródłami nieskalibrowanymi, w którym jeden woltomierz wykorzystywany jest do pomiaru obu napięć (U_1 i U_2 na rys. 1) zasilających porównywane wzorce, istotniejsze od niskiego poziomu napięcia szumów są jego małe wahania. Tylko stabilne wartości napięć są gwarancją uzyskania dużej dokładności komparacji wzorców impedancji.

Ze względu na niedostateczne tłumienie sygnału sumacyjnego woltomierza Agilent 3458A badania wzajemnej stabilności napięć na wyjściach dwufazowych źródeł napięcia przemiennego wykonano przy wykorzystaniu transformatora o wejściu symetrycznym i wyjściu asymetrycznym (rys. 4). Wyniki badań przeprowadzonych dla jednakowych napięć podanych na wejście transformatora świadczą o tłumieniu sygnału sumacyjnego w układzie na poziomie 110 dB. Do akwizycji danych pomiarowych wykorzystano komputer PC z aplikacją napisaną w środowisku Visual Basic. Zarówno w przypadku badań generatora Tabor WW2572A, jak i źródła AP SYS-2722 wykonano trzy serie pomiarów w temperaturze 25°C . Pierwszą z nich rozpoczęto po wstępnym godzinnym wygrzewaniu generatora, drugą – po czterech godzinach jego ciągłej pracy, natomiast ostatnią – następnego dnia, przy czym generator przez noc nie pracował. Wyniki pomiarów przedstawione na rys. 5 i 6 dotyczą najbardziej niekorzystnych przypadków, które miały miejsce w pierwszej serii pomiarowej. Z przeprowadzonych badań wynika, iż krótkoterminowa niestabilność generatora Tabor Electronics nie przekracza około $15 \mu\text{V/V}$, a niestabilność krótkoterminowa źródła AP SYS-2722 nie przekracza $10 \mu\text{V/V}$. Testy przeprowadzone przy obniżonej do 20°C temperaturze otoczenia wykazały, że niestabilność źródła WW2572A wzrasta do około $25 \mu\text{V/V}$. Nie zaobserwowano natomiast wpływu temperatury otoczenia na stabilność generatora AP SYS-2722.

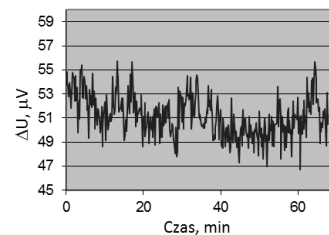


Rys. 4. Układ pomiarowy do badań stabilności amplitudy źródeł

Fig. 4. The measuring circuit for investigations of the source magnitude stability



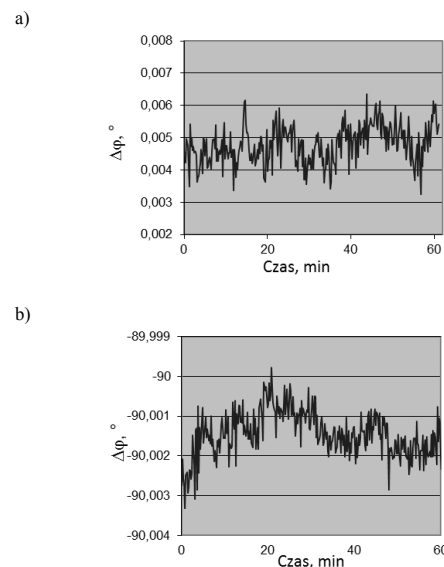
Rys. 5. Wyniki pomiarów wzajemnej stabilności amplitud generatora WW2572A
Fig. 5. Measurement results of the mutual magnitude stability for WW2572A generator



Rys. 6. Wyniki pomiarów wzajemnej stabilności amplitud źródła AP SYS-2722
Fig. 6. Measurement results of the mutual magnitude stability for AP SYS-2722 source

4. Stabilność krótkoterminowa przesunięcia fazowego

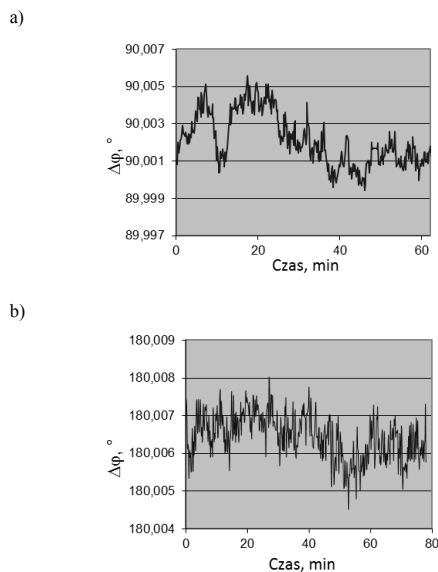
Badania stabilności przesunięcia fazowego przebiegów na wyjściach źródeł dwufazowych przeprowadzono za pomocą woltomierza wektorowego Stanford Research System SR830, wykorzystującego metodę detekcji fazoczułej. Badania wykonano w pomieszczeniu ekranowanym w temperaturze 25°C dla czterech różnych przesunięć fazowych $\Delta\varphi = \varphi_{\text{CH1}} - \varphi_{\text{CH2}}$: 0° , -90° , $+90^\circ$, 180° między napięciami na kanale nr 1 i 2 badanych źródeł dwufazowych WW2572A i SYS-2722.



Rys. 7. Wyniki pomiarów stabilności przesunięcia fazy między sygnałami wytwarzanymi przez generator WW2572A: a) dla zadanej różnicy faz $\Delta\varphi=0^\circ$, b) dla zadanej różnicy faz $\Delta\varphi=-90^\circ$

Fig. 7. Measurement results of the stability of the phase shift between the WW2572A generator output signals for the phase shift: a) $\Delta\varphi=0^\circ$, b) $\Delta\varphi=-90^\circ$

Wybrane wyniki badań przestawiono na rysunkach 7 i 8, odpowiednio dla generatora WW2572A i SYS-2722. Uzyskane wyniki świadczą o niestabilności przesunięcia fazy między sygnałami wytwarzanymi przez oba kanały nie większej niż $0,004^\circ$ dla generatora WW2572A oraz nie większej niż $0,006^\circ$ dla źródła AP SYS-2722.



Rys. 8. Wyniki pomiarów stabilności przesunięcia fazy między sygnałami wytwarzanymi przez źródło AP SYS-2722: a) dla różnicy faz $\Delta\varphi=90^\circ$, b) dla różnicy faz $\Delta\varphi=180^\circ$

Fig. 8. Measurement results of the stability of the phase shift between the AP SYS-2722 source output signals for the phase shift: a) $\Delta\varphi=90^\circ$, b) $\Delta\varphi=180^\circ$

Wpływ niestabilności fazy na wyniki komparacji wzorców impedancji można rozpatrywać podobnie jak wpływ rozdzielczości fazy analizowany w punkcie 1. W przypadku komparacji idealnych rezystorów o wartościach $1\text{ k}\Omega$ (rys. 2) niestabilność fazy równa $0,006^\circ$ powoduje względną niepewność wyznaczenia składowej rzeczywistej impedancji mierzonej na poziomie 10^{-8} . Jest to wartość pomijalnie mała w porównaniu ze składową niepewności wynikającą z niestabilności amplitudy.

5. Czystość widmowa

Badania czystości widmowej napięć wyjściowych źródeł przeprowadzono przy wykorzystaniu analogowego analizatora sygnałów będącego jednym z elementów wielofunkcyjnego przyrządu Audio Precision SYS-2722. Wbudowana w analizator funkcja THD+N umożliwia pomiar współczynnika zniekształceń nieliniowych zarówno sygnałów generowanych przez dwufazowe źródło wbudowane w SYS-2722, jak i sygnałów zewnętrznych doprowadzonych na wejście analogowe przyrządu. Badany sygnał jest poddawany filtracji przy użyciu przestrajanego filtra pasmowego. Częstotliwość filtra może być podana przez użytkownika lub automatycznie dobrana przez układ aż do uzyskania maksymalnej wartości harmonicznej podstawowej sygnału. Wynikiem analizy THD+N Ratio jest stosunek sumy zniekształceń nieliniowych i szumów odniesiony do sygnału użytecznego.

Badaniom czystości widmowej poddano kolejno każde z wyjść generatora WW2572A i SYS-2722. Wyjścia monitorowano przez okres jednej godziny rejestrując co sekundę chwilowe wartości współczynnika zniekształceń. Wyniki pomiarów wartości średnich, minimalnych i maksymalnych współczynnika zniekształceń nieliniowych dla badanego wyjścia generatora przedstawiono w tabeli 1. Uzyskane wyniki świadczą o bardzo dużej czystości widmowej badanych źródeł. Na uwagę zasługują szczególnie wyniki otrzymane dla źródła SYS-2722 gdzie wartości THD są na

poziomie -100 dB . Tak wysoką czystość widmową producent uzyskał dzięki zastosowaniu na wyjściach obu kanałów wysokiej klasy przetworników cyfrowo-analogowych.

Tab. 1. Współczynniki zniekształceń nieliniowych badanych źródeł
Tab. 1. THD for the considered two-phase sources

THD+N	Tabor Electronics WW2572A		Audio Precision SYS-2722	
	CH1	CH2	CH1	CH2
Średnia	0,070%	0,072%	0,001%	0,001%
Max.	0,072%	0,073%	0,001%	0,001%
Min.	0,068%	0,070%	0,001%	0,001%

6. Wnioski

Wyniki badań wzajemnej stabilności amplitud oraz stabilności wartości przesunięcia fazowego dwu poddanych analizie komercyjnych źródeł dwufazowych potwierdzają, iż realnie jest uzyskanie niepewności komparacji wzorców impedancji na poziomie kilkudziesięciu $\mu\Omega/\Omega$ zarówno przy wykorzystaniu w układzie generatora WW2572A jak i źródła AP SYS-2722. Stabilność badanych źródeł jest porównywalna z wynikami otrzymanymi przez inny zespół badawczy dla generatora zbudowanego na bazie modułowego systemu pomiarowego PXI [7].

Dla rozważanego na wstępie przypadku porównania dwóch idealnych wzorców rezystancji otrzymana w wyniku badań maksymalna niestabilność stosunku amplitud źródła AP SYS-2722 na poziomie $10\text{ }\mu\text{V/V}$ i względna niestabilność faz na poziomie $0,006^\circ$ przekłada się na względną niepewność porównania wzorców na poziomie 10^{-5} . Wartość ta jest zadowalająca z punktu widzenia zastosowania źródeł w układach kalibracji wzorców impedancji o niepewności komparacji rzędu kilkudziesięciu $\mu\text{V/V}$.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2012-2013 (projekt Iuventus Plus nr IP2011 037571).

7. Literatura

- [1] Muciek A.: System do komparacji wzorców indukcyjności oparty na pomiarach napięć. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 7-8, 2002, s. 81-84.
- [2] Musioł K., Met A., Skubis T.: Automatic Bridge for Comparison of Inductance Standards. Measurement, Volume 43, Issue 10, December 2010, pp. 1661 – 1667.
- [3] Rybski R.: Komparacja impedancji w układach z cyfrowymi źródłami napięć sinusoidalnych. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2007.
- [4] Met A., Skubis T., Hanke R., Kölling A., Musioł K.: Dissemination of the Unit of Inductance with a New Automatic 1:1 Comparator. Regional Metrology Conference, Nairobi, Kenya, 19 – 24.09.2005.
- [5] Kampik M.: Cyfrowe źródła wzorcowego napięcia przemiennego o małej częstotliwości. Monografia 224. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- [6] Kampik M.: Comparison of Non-Quantum Methods for Calibration of the Digital Source of Very-Low-Frequency AC Voltage, IEEE Trans. Instrum. Meas. DOI: 10.1109/TIM.2012.2225960.
- [7] Rybski R., Kaczmarek J., Kozioł M.: Dwufazowy cyfrowy generator napięć sinusoidalnych do zastosowań w dokładnych pomiarach impedancji. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 1, 2012, s. 27-29.
- [8] Rybski R., Kaczmarek J.: Wpływ parametrów źródła napięcia na dokładność pomiaru impedancji w układzie mostkowym. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach – Seria: Konferencje Nr 8, 2005, s. 53-60.

otrzymano / received: 18.02.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.04.2013

artykuł recenzowany / revised paper