

**Krzysztof MUSIOŁ**

INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ,  
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

**Badania współczynników temperaturowych wzorców impedancji**

Dr inż. Krzysztof MUSIOŁ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Studia na kierunku Elektrotechnika, specjalność Automatyka i Metrologia Elektrotechniczna ukończył w roku 2002. 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

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań współczynników temperaturowych wzorców impedancji różnego typu. Badaniu poddano wzorce powszechnie wykorzystywane w Krajowych Instytutach Metrologicznych, produkcji: IET Labs (General Radio), Tinsley i TS5. Pomiar przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w termostat powietrzny i precyzyjny mostek RLC. Wartości współczynników temperaturowych otrzymane dla wzorców komercyjnych nie odbiegają od wartości podawanych w specyfikacjach producentów o więcej niż 3 ppm/K. Wyjątek stanowi tutaj wynik otrzymany dla wzorca GenRad 1482-L metodą pomiaru zmian rezystancji DC, który jest o 6 ppm/K niższy od wyniku otrzymanego przy bezpośrednich pomiarach zmian indukcyjności.

**Słowa kluczowe:** termostat powietrzny, współczynnik temperaturowy, wzorzec impedancji.

**Investigations of the temperature coefficients of impedance standards****Abstract**

The results of investigations of temperature coefficient obtained for different types of impedance standards are presented in the paper. The measurements were made for standards commonly used at National Metrology Institutes, produced by Tinsley, IET Labs., and 5. The research was conducted on the station equipped with an air thermostat and a precision RLC meter. The values of the temperature coefficients obtained for commercial standards (Fig. 3) do not differ from those given in the manufacturer specifications (Table 1) by more than 3 ppm/K. The exception is the result obtained for the GenRad 1482-L standard with use of the method based on DC resistance measurements (Fig. 4). The result is 6 ppm/K lower than that obtained during direct measurements of inductance changes. It is worth noting that the research team at the National Physical Laboratory (London) also showed significantly lower values of temperature coefficients investigated by measuring DC resistance changes. [7]. This is the basis for claiming a somewhat undervalued DC to inductance conversion factor proposed by the General Radio manufacturer. The values of the temperature coefficients obtained for TS5 standards have a significant range, from 14 to 25 ppm/K (Fig. 3). It is very important information in terms of estimating the uncertainty component associated with temperature changes. For the extreme worst case of comparison of impedance standards with significantly different temperature coefficients (e.g. the 1404 capacitance standard having temperature coefficient  $0,3 \cdot 10^{-6}$  1/K with the inductance standard having temperature coefficient  $31 \cdot 10^{-6}$  1/K), 0,1 K temperature change causes the relative error of the impedance ratio on the level of  $3 \cdot 10^{-6}$ .

**Keywords:** air thermostat, temperature coefficient, impedance standard.

**1. Wprowadzenie**

Krajowe Instytuty Metrologiczne (ang. NMIs<sup>1</sup>) i laboratoria wykonujące pomiary na najwyższym poziomie dokładności starają się zapewnić stabilne warunki środowiskowe podczas prowadzonych pomiarów. Szczególną uwagę przywiązuje się do stabilności temperatury, gdyż dla niektórych wielkości fizycznych (jak np.

lepkość cieczy) wpływ temperatury na własności fizyczne jest na tyle silny, że zmiany na poziomie 0,1 Kelvina prowadzą do kilku-procentowych błędów pomiarowych.

Wzorce pierwotne podstawowych wielkości elektrycznych, wykorzystywane do utrzymywania jednostek miar charakteryzują się względną wrażliwością na zmiany temperatury otoczenia od  $10^{-7}$  1/K (wzorce napięcia stałego Fluke 732B) do ok.  $3 \cdot 10^{-5}$  1/K (wzorce indukcyjności własnej typu 1482). Zazwyczaj podczas precyzyjnych komparacji wzorców laboratoria dążą do ustabilizowania warunków środowiskowych na takim poziomie, aby wpływ temperatury na wyniki komparacji mógł być zaniedbany [1, 2].

W precyzyjnych pomiarach składowych impedancji wykorzystywane są zazwyczaj metody bezpośredniego porównania obiektu badanego ze wzorcem odniesienia o znanych (np. z komparacji międzynarodowej) parametrach. Przykładem przyrządu umożliwiającego komparację wzorców indukcyjności jest wielozakresowy komparator wzorców indukcyjności KWL 5 [3, 4], opracowany w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki (IMEiA) Politechniki Śląskiej w Gliwicach, a zastosowany w laboratorium wzorców impedancji instytutu Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Brunshwiku (Niemcy). W ostatnich latach ze względu na rozwój cyfrowych źródeł napięcia przemiennego w niektórych Krajowych Instytutach Metrologicznych zaczęto stosować do komparacji wzorców impedancji dwufazowe generatory wykorzystujące bezpośrednią syntezę częstotliwości [5]. Możliwe jest zatem wykorzystanie tego samego układu zarówno do komparacji wzorców o tym samym charakterze<sup>2</sup> (ang. like impedances), jak i do komparacji wzorców różnych typów<sup>3</sup> (ang. unlike impedances). Stosunek impedancji jest w tym przypadku wyznaczany bezpośrednio na podstawie znanego zespolonego stosunku napięć.

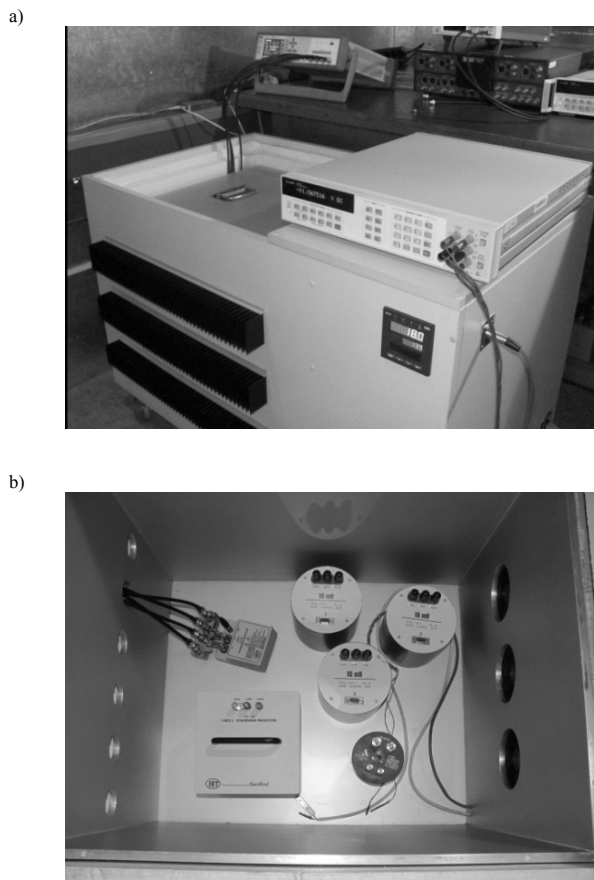
Z punktu widzenia dokładności komparacji wzorców impedancji tego samego typu we wspomnianych wyżej układach istotne znaczenie odgrywają nie poszczególne wartości, lecz różnice współczynników temperaturowych porównywanych wzorców. Nawet w przypadku znacznych lecz porównywalnych współczynników temperaturowych komparowanych wzorców, wpływ temperatury na wynik komparacji jest pomijalnie mały. Tymczasem w układach typu rezonansowego (np. opisanych w pozycjach [6], [7]), gdzie komparowana jest bezpośrednio indukcyjność z pojemnością zmiany temperaturowe wzorców się sumują (a nie odejmują jak to jest w przypadku komparacji wzorców tego samego typu). Również w mostku Maxwella-Wiena stosowanym w Krajowych Instytutach Metrologicznych do wyznaczania wartości indukcyjności w odniesieniu do pojemności współczynniki temperaturowe się sumują. W przypadku komparacji wzorców różnego typu suma współczynników temperaturowych może przekraczać nawet  $5 \cdot 10^{-5}$  1/K. Zatem uzyskanie niepewności komparacji poniżej  $5 \cdot 10^{-6}$  wiąże się z ustabilizowaniem temperatury z dokładnością do setnych części stopnia. Takiego wymogu nie jest w stanie spełnić żaden, nawet najbardziej zaawansowany układ klimatyzacji pomieszczeń. Również komercyjnie dostępne komory klimatyczne nie są w stanie zapewnić stabilności lepszej niż 0,1 K. Należy zaznaczyć, że tylko niektóre wzorce impedancji (szczególnie wzorce rezystancji) przystosowane są do pracy w kąpielii olejowej, zatem w zdecydowanej większości przypadków termostaty cieczowe nie mogą być stosowane przy komparacjach wzorców impedancji. Jedynym rozwiązaniem jest zatem skonstruowanie odpowiednio izolowanego i precyzyjnie sterowanego termostatu powietrznego służącego do przechowywania wzorców podczas wykonywanych komparacji. IMEiA Politechniki Śląskiej dysponuje termostatem powietrznym własnej produkcji

<sup>1</sup> ang. National Metrology Institutes

<sup>2</sup> czyli porównanie R-R, L-L, C-C i L-C

<sup>3</sup> porównanie R-L i R-C

(rys. 1a), wykonanym przez zespół pod kierownictwem autora niniejszej pracy, zapewniającym dwunastogodzinną stabilność temperatury na poziomie 0,03 K [8].



Rys. 1. Stanowisko badawcze wzorców impedancji: a) wygląd ogólny, b) wzorce w termostacie  
Fig. 1. The station for investigations of impedance standards: a) view, b) standards in thermostat

## 2. Wzorce impedancji w IMEiA

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki posiada zestaw wzorców impedancji (rys. 1 b) złożony z:

- 1) wzorca rezystancji Tinsley 5685B1 o wartości nominalnej 1 k $\Omega$ ,
- 2) wzorca pojemności GenRad 1409-T o wartości nominalnej 100 nF,
- 3) wzorca indukcyjności własnej GenRad 1482-L o wartości nominalnej 100 mH,
- 4) trzech wzorców indukcyjności własnej TS 5 własnej produkcji o wartościach nominalnych 10 mH.

Elementy wymienione w punktach 1) ÷ 3) to najwyższej klasy wzorce impedancji stosowane powszechnie w renomowanych Krajowych Instytutach Metrologicznych na całym świecie (np. w PTB, NPL, NIST). Współczynniki temperaturowe wzorców komercyjnych stosowanych w IMEiA zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Współczynniki temperaturowe wzorców impedancji stosowanych w IMEiA

Tab. 1. The temperature coefficients of impedance standards used at IMEiA

Typ wzorca	Współczynnik temperaturowy na podstawie danych katalogowych producenta
5685B1	typowo 2 ppm/K
1409-T	20 ppm/K
1482-L	średnio 30 ppm/K

Ponadto dla wzorców indukcyjności własnej GenRad typu 1482 producent podaje, że wartość współczynnika temperaturowego można wyliczyć na podstawie zmian rezystancji przy prądzie stałym. Jednoprocentowy przyrost rezystancji DC odpowiada przyrostowi indukcyjności wzorca równej 0,0076%.

## 3. Wyniki badań

Współczynniki temperaturowe podawane przez producentów wzorców impedancji należy traktować jako orientacyjne. Z doświadczenia autora zdobytego podczas stażu w renomowanym instytucie metrologicznym PTB w Niemczech i w Głównym Urzędem Miar w Warszawie, jak również z prac publikowanych przez naukowców z Krajowych Instytutów Metrologicznych [9] wynika, że wartości rzeczywiste współczynników temperaturowych wzorców tego samego producenta i o tej samej wartości nominalnej mogą różnić się od siebie nawet o 5 ppm/K. Z punktu widzenia dokładności komparacji wzorców impedancji celowe jest zatem zbadanie rzeczywistych wartości współczynników temperaturowych wzorców wykorzystywanych w instytutowym laboratorium dokładnych pomiarów elektrycznych. Znajomość wrażliwości wzorców na zmiany temperatury w połączeniu ze znaną stabilnością termostatu powietrznego wykorzystywanego do przechowywania wzorców pozwala oszacować składową niepewności komparacji związaną z wpływem temperatury.

Badania współczynników temperaturowych wzorców wymienionych w tabeli 1 przeprowadzono w IMEiA Politechniki Śląskiej w Gliwicach na stanowisku pomiarowym wyposażonym w termostat powietrzny własnej produkcji [8] i w precyzyjny mostek do pomiaru składowych impedancji Agilent E4980A o niepewności pomiaru na poziomie  $5 \cdot 10^{-4}$ . Mostek przeznaczony jest do pomiarów czteroportowych współosiowych (ang. four terminal-pair<sup>4</sup>), zatem konieczne było zaprojektowanie i wykonanie odpowiedniego adaptera (rys. 2), przystosowując w ten sposób wzorce trójzaczaskowe o standardowym rozstawie 3/4 cala do pomiarów czteroportowych współosiowych o wyprowadzeniach typu BNC. Badania zmian składowej impedancji wzorców indukcyjności własnej i wzorca pojemności wykonano dla sześciu temperatur z zakresu od 15 do 40°C przy prądzie nie przekraczającym 10 mA. Eksperymentalnie sprawdzono, że prąd taki nie powoduje dostrzegalnych zmian parametru wzorca wywołanych samopodgrzewaniem się obiektu. Dla wzorca rezystancji, w tabeli 2, zamieszczono wyniki pomiarów zmian rezystancji w zakresie temperatur od 17 do 27°C wykonane w laboratorium Tinsley w Redhill (Anglia).



Rys. 2. Adapter czteroportowy podłączony do wzorca 1482-L  
Fig. 2. A four-terminal-pair adapter connected to the 1482-L standard

Każdy z badanych wzorców indukcyjności i pojemności był umieszczany w termostacie o ustabilizowanej temperaturze na co najmniej 12 h przed właściwym pomiarem składowej impedancji. Jest to uwarunkowane własnościami dynamicznymi wzorców,

<sup>4</sup> Dwa ekranowane zaciski prądowe i dwa ekranowane napięciowe

zbadanymi przez zespół z National Physical Laboratory (NPL, Londyn) [7].

Tab. 2. Wyniki pomiarów rezystancji wzorca Tinsley

Tab. 2. The measurements results of DC resistance for the Tinsley standard

Temperatura, °C	Wzorzec 5685B1
	$R_s, \Omega$
18	999,9987
19	999,9990
20	999,9993
21	999,9997
22	1000,0000
23	1000,0003
24	1000,0006
25	1000,0009
26	1000,0012
27	1000,0015

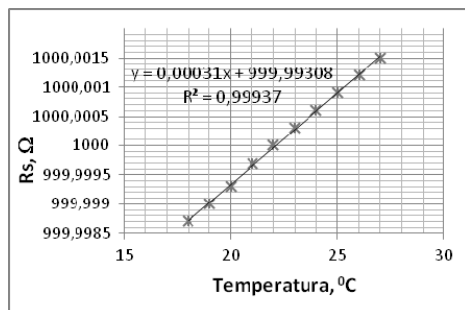
Wyniki pomiarów parametrów wzorców indukcyjności i wzorca pojemności zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów składowej impedancji wzorców indukcyjności i wzorca pojemności

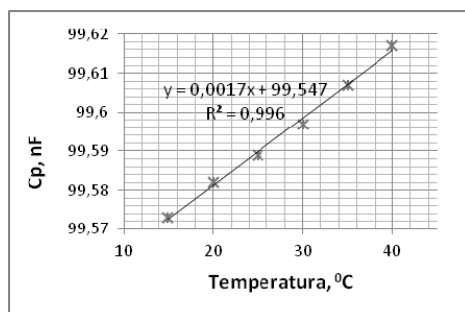
Tab. 3. The measurements results of the impedance component for inductance and capacitance standards

Temperatura, °C	Wzorzec 1409-T	Wzorzec 1482-L	Wzorzec TS 5 No.01	Wzorzec TS 5 No.02	Wzorzec TS 5 No.03
	$C_p, \text{nF}$	$L_{s1}, \text{mH}$	$L_{s2}, \text{mH}$	$L_{s3}, \text{mH}$	$L_{s4}, \text{mH}$
15	99,573	99,9981	10,00236	10,00616	10,00670
20	99,582	100,0068	10,00310	10,00680	10,00772
25	99,589	100,0252	10,00392	10,00763	10,00891
30	99,597	100,0415	10,00458	10,00842	10,01012
35	99,607	100,0582	10,00527	10,00921	10,01153
40	99,617	100,0735	10,00585	10,01035	10,01281

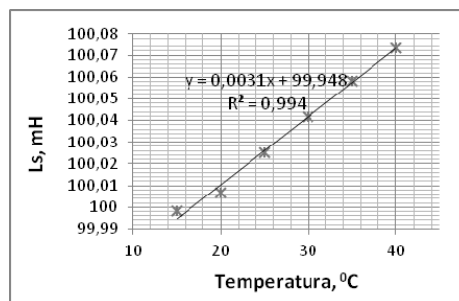
a)



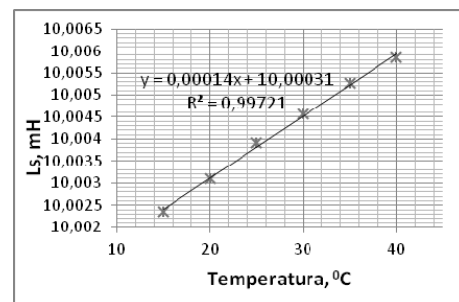
b)



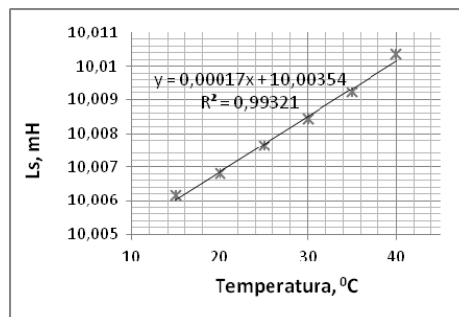
c)



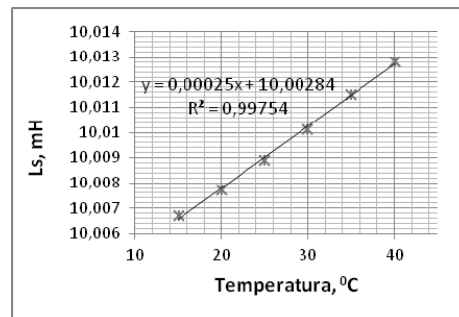
d)



e)



f)



Rys. 3. Wyniki badań współczynników temperaturowych wzorca:  
a) rezystancji Tinsley 5685B1,  
b) wzorca pojemności GenRad 1409-T,  
c) wzorca indukcyjności własnej GenRad 1482-L,  
d) wzorca indukcyjności własnej TS 5 No.01,  
e) wzorca indukcyjności własnej TS 5 No.02,  
f) wzorca indukcyjności własnej TS 5 No.03

Fig. 3. The investigation results of the temperature coefficients for:

- a) resistance standard Tinsley 5685B1,  
b) capacitance standard GenRad 1409-T,  
c) inductance standard GenRad 1482-L,  
d) inductance standard TS 5 No.01,  
e) inductance standard TS 5 No.02,  
f) inductance standard TS 5 No.03

Wyniki badań współczynników temperaturowych wszystkich wzorców zamieszczono na rys. 3a-f.

Z otrzymanych wykresów wynikają następujące rzeczywiste współczynniki temperaturowe wzorców:

- 1) dla wzorca rezystancji Tinsley 5685B1 – 0,31 ppm/K
- 2) dla wzorca pojemności GenRad 1409-T – 17 ppm/K
- 3) dla wzorca indukcyjności GenRad 1482-L – 31 ppm/K
- 4) dla wzorca indukcyjności TS 5 No.01 – 14 ppm/K
- 5) dla wzorca indukcyjności TS 5 No.02 – 17 ppm/K
- 6) dla wzorca indukcyjności TS 5 No.03 – 25 ppm/K.

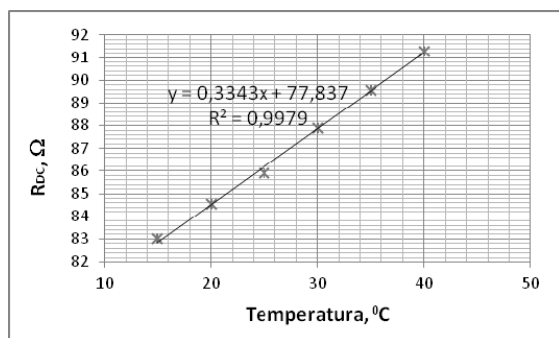
Wartości współczynników determinacji  $R^2$  zamieszczonych na wykresach świadczą o bardzo dobrym dopasowaniu modeli.

Dla wzorca indukcyjności własnej GenRad 1482-L możliwe jest wyznaczenie współczynnika temperaturowego również inną metodą, korzystając z podanej przez producenta zależności między przyrostem rezystancji wzorca przy prądzie stałym a przyrostem indukcyjności. Zbadano zatem zmiany rezystancji uzwojenia cewki przy prądzie stałym przy zmianach temperatury w zakresie od 15 do 40°C. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli 4 i na rys. 4. Biorąc pod uwagę podany przez producenta przelicznik przyrostu rezystancji DC na przyrost indukcyjności wzorca równy 0,0076 otrzymuje się współczynnik temperaturowy indukcyjności wzorca  $\alpha_L = 0,3343 \cdot 0,0076 = 0,0025\%/K = 25\text{ppm}/K$ .

Tab. 4. Wyniki pomiarów rezystancji przy prądzie stałym wzorca GenRad 1482-L

Tab. 4. The measurement results of DC resistance for the GenRad 1482-L standard

Temperatura, °C	Wzorzec GenRad 1482-L
	$R_{DC}, \Omega$
15	83,01
20	84,53
25	85,92
30	87,88
35	89,58
40	91,28



Rys. 4. Wyniki badań współczynnika temperaturowego rezystancji wzorca indukcyjności własnej GenRad 1482-L

Fig. 4. The investigations results of the DC resistance temperature coefficient for the inductance standard GenRad 1482-L

#### 4. Podsumowanie

Wartości współczynników temperaturowych otrzymane dla wzorców komercyjnych nie odbiegają od wartości podawanych w specyfikacjach producentów o więcej niż 3 ppm/K. Wyjątek

stanowi tutaj wynik otrzymany dla wzorca GenRad 1482-L metodą pomiaru zmian rezystancji DC, który jest o 6 ppm/K niższy od wyniku otrzymanego przy bezpośrednich pomiarach zmian indukcyjności. Warto podkreślić, iż badania zespołu z National Physical Laboratory (Londyn) również wykazały znacznie mniejsze wartości współczynników temperaturowych badanych metodą pomiaru rezystancji przy prądzie stałym [7]. Jest to podstawą do wnioskowania o nieco zaniżonej wartości przelicznika zmian rezystancji na zmianę indukcyjności zaproponowanego przez producenta wzorców General Radio.

Wartości współczynników temperaturowych wzorców TS 5 wykazują znaczny rozrzut (od 14 do 25 ppm/K). Jest to bardzo istotna informacja z punktu widzenia szacowania składowej niepewności komparacji związanej z wpływami temperatury. Dla skrajnie niekorzystnego przypadku komparacji wzorców impedancji o znacznie różniących się współczynnikach temperaturowych (np. wzorca pojemności 1404 o współczynniku temperaturowym  $0,3 \cdot 10^{-6} 1/K$  z wzorcem indukcyjności własnej o współczynniku  $31 \cdot 10^{-6} 1/K$ ) zmiana temperatury o 0,1 K podczas pomiaru spowoduje względny błąd pomiaru stosunku impedancji rzędu  $3 \cdot 10^{-6}$ .

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

#### 5. Literatura

- [1] Dean G. Jarrett: Constant Temperature and Humidity Chamber for Standard Resistors, NCSL Workshop & Symposium, Dallas, TX, July 1995.
- [2] Kolling A., Hanke R., Klönz M., Skubis T.: Kalibrierung von Induktivitätsnormalen mit Hilfe eines 1:1 Komparators, 206. PTB-Seminar Neue Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich, Braunschweig 2005.
- [3] Musioł K., Met A.: Procedury pomiaru i kalibracji wielozakresowego komparatora impedancji. Materiały z Sympozjum Elektryczne Pomiaru Dokładne, Wydawnictwo PAK, Ustroń, 2010.
- [4] Musioł K., Met A., Skubis T.: Automatic Bridge for Comparison of Inductance Standards. Measurement, Volume 43, Issue 10, December 2010, pp. 1661 – 1667.
- [5] Popek G., Kampik M., Musioł K.: Fluktuacje wartości skutecznej sygnału sinusoidalnego generowanego przez źródła wykorzystujące bezpośrednią syntezę częstotliwości (DDS). PAK 08/2010, str. 836-839.
- [6] Cabiati F., Bosco G.C.: LC comparison system based on two-phase generator, IEEE Trans. On Instr. And Meas. Vol. 36, No. 2, 1987, pp. 411-417.
- [7] Muciek A.: A combined transformer bridge for precise comparison of inductance with capacitance, IEEE Trans. On Instr. And Meas. Vol. 32, 1983.
- [8] Musioł K., Met A.: Wysokostabilny termostat powietrzny do badań wzorców impedancji. Materiały 44 Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Ustroń, 2012.
- [9] Ansari M.A., Jyotsana and Anil Kishore Saxena, K. S. Krishnan Marg: Comparison of Temperature Coefficient of Standard Inductor by Measuring Change in Inductance and Resistance. Conference of Precision Electromagnetics Measurement, Dae-jeon, Korea, 2010.

otrzymano / received: 03.04.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper