

Adam ZIÓŁEK, Maciej KOSZARNY

GŁÓWNY URZĄD MIAR,
ul. Elekoralna 2, 00-139 Warszawa

Wykorzystanie komparatora RLC w pomiarach elementów państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej

Mgr inż. Adam ZIÓŁEK

Absolwent Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej kierunku Fizyka Techniczna (2009 r.). Jest starszym metrologiem w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Zakładu Elektrycznego w Głównym Urzędzie Miar. Jest opiekunem państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej i zajmuje się pomiarami w dziedzinie pojemności elektrycznej, indukcyjności i rezystancji AC.



e-mail: a.ziolek@gum.gov.pl

Maciej KOSZARNY

Jest wieloletnim pracownikiem Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Zakładu Elektrycznego w Głównym Urzędzie Miar. Zajmuje się wzorcowaniem mostków do pomiaru wielkości elektrycznych, a także udoskonalaniem sprzętu i opracowywaniem nowych technik pomiarowych.



e-mail: m.koszarny@gum.gov.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wykorzystanie komparatora *RLC* w badaniu elementów państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej i jego wzorców odniesienia. Badania przy pomocy komparatora dokonano trzema metodami: metodą bezpośredniego porównania, podstawienia i przestawienia wzorców miejscami. Otrzymane wyniki pokazują, że zastosowanie komparatora *RLC* do pomiarów wzorców pojemności pozwala na wyznaczenie ich wartości z niższą niepewnością pomiaru w porównaniu ze stosowanymi dotychczas mostkami transformatorowymi.

Słowa kluczowe: wzorcowanie, pojemność elektryczna, komparator *RLC*.

Use of RLC comparator for measurements of elements of national standard of capacitance unit

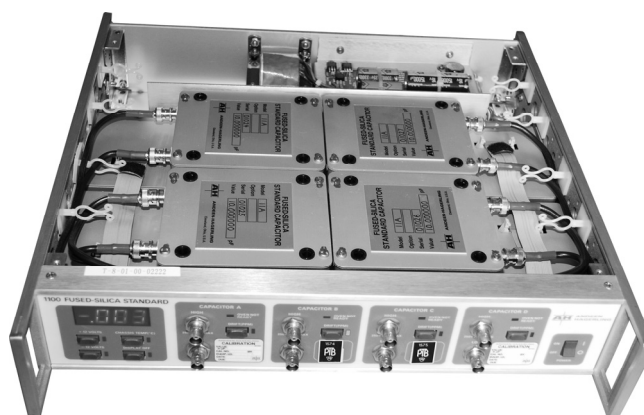
Abstract

The paper presents the use of a comparator *RLC* for measurements of elements of the national standard of capacitance unit which consists of four 10 pF capacitors of type 11A. The measurements of the national standard were made using transformer bridges: AH 2500A and GR 1621. To calculate the real values of each capacitor the group method was used. The relative combined standard uncertainty for the group method is equal to 0,5 $\mu\text{F}/\text{F}$. The reference standards for the national standard of capacitance units are: capacitor 100 pF of type 11A, capacitors 10 pF and 100 pF of type 1408 and capacitors 10 pF, 100 pF and 1000 pF of type 1404. The measurements of elements of the national standard of capacitance unit by means of the *RLC* comparator are made using three methods: direct comparison, substitution and replacing of standards. The results obtained show that the use of the comparator *RLC* for measuring the standards of capacitance allows determining their value with a lower measurement uncertainty compared with the previously used transformer bridges. The relative combined standard uncertainty of the capacitors 10 pF of type 11A is less than $0,2 \times 10^{-6}$ and of the reference standards is less than 3×10^{-6} for the measurement methods using the *RLC* comparator.

Keywords: calibration, capacitance, RLC comparator, replacing, substitution, group method.

1. Wstęp

Wzorec państwowy jednostki miary pojemności elektrycznej jest układem pomiarowym składającym się z grupy czterech termostatyzowanych kondensatorów z dielektrykiem z topionej krzemionki o wartości nominalnej pojemności elektrycznej 10 pF oraz z precyzyjnych mostków transformatorowych. Niepewność rozszerzona względna odtwarzania jednostki miary pojemności elektrycznej dla poziomu ufności 95 % wynosi 0,5 $\mu\text{F}/\text{F}$ dla częstotliwości 1000 Hz i 1592 Hz.



Rys. 1. Państwowy wzorec jednostki miary pojemności elektrycznej
Fig. 1. The national standard of capacitance unit

Pomiary elementów wzorca grupowego przeprowadzane są za pomocą automatycznego mostka transformatorowego AH 2500A przy częstotliwości 1 kHz. Wartość grupowa grupy wzorców wyznaczona jest jako średnia z wartości poprawnych pojemności czterech kondensatorów. Wartości kondensatorów wchodzących w skład grupy ustalane są na podstawie zmierzonych różnic między ich wartościami przy porównaniu "każdego z każdym".

Wzorcami odniesienia powiązanymi układem sprawdzają z wzorcem państwowym jednostki miary pojemności elektrycznej przy częstotliwości 1000 Hz i 1592 Hz są:

- kondensator o wartości 100 pF typu 11A umieszczony w ramie termostatycznej
- kondensatory o wartościach 10 pF i 100 pF typu 1408 umieszczone w termostacie powietrznym, charakteryzujące się współczynnikiem temperaturowym 12 $\mu\text{F}/\text{F}/\text{K}$.
- kondensatory o wartościach 10 pF, 100 pF i 1000 pF typu 1404 charakteryzujące się współczynnikiem temperaturowym 5 $\mu\text{F}/\text{F}/\text{K}$.

Rozszerzenie zakresu wzorca odniesienia w stosunku do wartości pojemności elektrycznej państwowego wzorca jednostki miary równej 10 pF następuje poprzez zastosowanie mostka transformatorowego (GR 1621), który pozwala na porównanie wartości pojemności dwóch kondensatorów z ilorzem wartości 1:10, 10:1 i 1:1. Pomiary przy pomocy mostka 1621 mogą być wykonywane dla częstotliwości 1 kHz i 1,59 kHz.

Dzięki zastosowaniu komparatora *RLC* możliwy jest precyzyjny pomiar wartości elementów wzorca państwowego. Komparator ten umożliwia bezpośrednie porównanie dwóch wzorców w stosunku 1:1, jak również pomiary w stosunku impedancji 10:1.

Niepewność rozszerzona względna przekazywania jednostki miary przy poziomie ufności 95 % dla elementów wzorca państwowego nie przekracza 0,2 $\mu\text{F}/\text{F}$ i jest uwarunkowana przede wszystkim niezrównoważeniem i czułością komparatora. Niepewność rozszerzona dla wzorców odniesienia nie przekracza 3 $\mu\text{F}/\text{F}$.

2. Metody pomiarowe

2.1. Metoda grupowa

Kondensatory typu 11A o wartościach nominalnych 10 pF są wysyłane w okresach 3 letnich do wzorcowania w BIPM. Następnie w oparciu o otrzymane świadectwa wzorcowania i o uzyskane w laboratorium pomiary różnic pomiędzy wszystkimi wartościami ustalana jest wartość grupowa państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej z następującego wzoru:

$$C_{gr} = C_B - 0,25(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3), \quad (1)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= C_B - C_A \\ \beta_2 &= C_B - C_C \\ \beta_3 &= C_B - C_D \end{aligned} \quad (2)$$

C_B jest wartością pojemności elektrycznej wzorca odniesienia wyznaczoną względem wzorca pierwotnego o wyższej dokładności (świadectwo BIPM), C_A, C_C, C_D są zmierzonymi wartościami pojemności elektrycznej pozostałych kondensatorów grupy.

Następnie wyznaczane są wartości poprawne kondensatorów A, C i D z następujących wzorów:

$$\begin{aligned} C_A &= C_{gr} + 0,25(-\beta_1 + \beta_4 + \beta_5) \\ C_C &= C_{gr} + 0,25(-\beta_2 - \beta_4 + \beta_6) \\ C_D &= C_{gr} + 0,25(-\beta_3 - \beta_5 - \beta_6) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \beta_4 &= C_A - C_C \\ \beta_5 &= C_A - C_D \\ \beta_6 &= C_C - C_D \end{aligned} \quad (4)$$

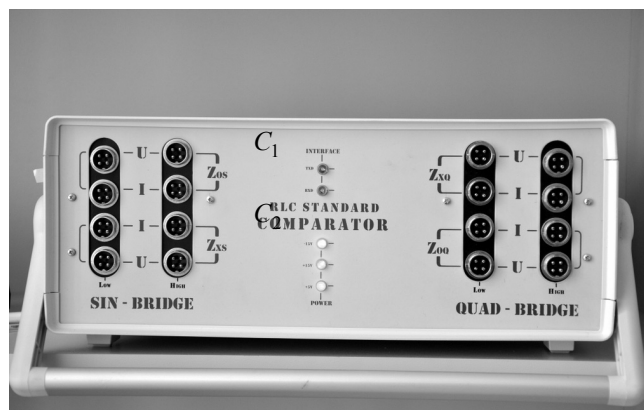
Pomiędzy wzorcowaniami w BIPM ze względu na to, że wartości kondensatorów dryfują, wartość grupowa musi być korygowana. Korekcja wartości grupowej oparta jest na obserwacjach wzorców w całym okresie ich użytkowania w laboratorium i na świadectwach wzorcowania. Wykonywane są okresowe wzajemne porównania wzorców i na podstawie powyższych wzorów obliczane ich aktualne wartości poprawne.

Pomiary te wykonywane są przy pomocy mostka firmy Andeen-Hagerling typu 2500A dla częstotliwości 1 kHz, a także mostka firmy General Radio typu 1621 dla częstotliwości 1 kHz i 1,59 kHz.

2.2. Metoda bezpośredniego porównania

Komparator RLC typu 2100, składa się z dwóch komparatorów: synfazowego (współfazowo - przeciwfazowego) oraz kwadraturowego, które umożliwiają przenoszenie jednostek tego samego rodzaju ($R-R, C-C, L-L, C-L$) oraz ortogonalnych do siebie ($R-C$).

System pozwala na przeprowadzanie porównań parametrów wzorców jednostek miar przy różnych stosunkach impedancji, przy dowolnej wartości parametru dodatkowego (tangensa kąta fazowego i tangensa kąta stratności), ale także umożliwia przekazanie wartości tych jednostek od odpowiednich wzorców pierwotnych do wzorców miar wielkości fizycznych [1, 2](rys. 2).



Rys. 2. Komparator RLC typu 2100
Fig. 2. The RLC comparator of type 2100

Komparator RLC stanowi generator napięcia sinusoidalnie zmiennego U_0 , komparator kwadraturowy oraz sinusoidalny, obwód kalibracji i woltomierz wektorowy. System sterowany jest przy pomocy komputera klasy PC.

W przypadku porównań wartości elementów o charakterze zbliżonym do reaktancyjnego wykorzystywany jest komparator sinusoidalny. Układ ten stanowi mostek transformatorowy, który może pracować w konfiguracji synfazowej (porównanie $C-C, L-L$) jak i w układzie przeciwfazowym (porównanie $C-L$). Równoważenie komparatorów sterowane jest komputerowo. Detektorem równowagi w przypadku systemu RLC jest wspólny dla obu komparatorów wektorowy woltomierz cyfrowy [3].

Komparator RLC typu 2100 jest urządzeniem, które pozwala na porównywanie wzorców impedancji w stosunku 1:1 i 1:10 z bardzo wysoką precyzją, tak więc został on zastosowany do pomiarów elementów wzorca państwowego pojemności elektrycznej.

Konstrukcja komparatora sinusoidalnego jest taka, że jako C_1 (oznaczone na rysunku 2) podłączony jest wzorec o mniejszej impedancji niż wzorec C_2 . Porównanie wzorców o jednakowych wartościach nominalnych (10 pF) może się odbywać trzema sposobami.

W metodzie bezpośredniego porównania dokonuje się tego w następujący sposób:

- do komparatora podłączane są wzorce (przykładowo wzorec o znanej wartości pojemności jako C_2),
- do programu komparatora wpisywana jest wartość poprawna pojemności wzorca odniesienia (C_2),
- zadawany jest transfer $C_2 \rightarrow C_1$,
- wynik porównania jest widoczny w okienku pomiarowym.

Błąd komparatora dla dowolnego transferu obliczany jest z następującego wzoru:

$$\delta_C = \delta_{ci} \left(1 + \alpha_i \frac{C_2}{C_1}\right) + \Delta \cdot \delta_{vi}, \quad (5)$$

gdzie:

$$\Delta = \frac{C_{1r} - C_{1n}}{C_n} \pm \frac{C_{2r} - C_{2n}}{C_{2n}} \quad (6)$$

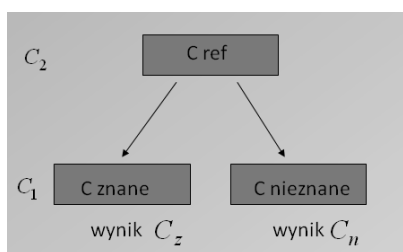
jest niezrównoważeniem komparatora, C_1, C_2 są mierzonymi wartościami pojemności, $\delta_{ci}, \delta_{vi}, \alpha_i$ są współczynnikami ze specyfikacji producenta. C_{1r} i C_{2r} są rzeczywistymi wartościami pojemności elektrycznej mierzonych kondensatorów, natomiast C_{1n} i C_{2n} ich wartościami nominalnymi. Znak „ \pm ” w równaniu (6) stosowany jest, gdy oba kondensatory mają wartości pojemności powyżej lub poniżej wartości nominalnej, natomiast znak „ $+$ ”, gdy jeden z kondensatorów ma wartość pojemności mniejszą od nominalnej a drugi większą lub odwrotnie.

Przy porównywaniu wzorców przy użyciu metody bezpośredniego porównania należy dodatkowo brać pod uwagę przesunięcie zera komparatora. Biorąc pod fakt, że stratność kondensatorów wchodzących w skład państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej (10 pF typu 11A) jest rzędu 1 $\mu\text{F}/\text{F}$ i ich wartości rzeczywiste są bardzo bliskie wartości nominalnej (różnice od nominalnej poniżej 0,0004 %), więc niezrównoważenie komparatora Δ jest pomijalnie małe i dla metody bezpośredniego porównania błąd przeniesienia wyliczany jest z pierwszego członu równania (5), który jest dominujący.

2.3. Metoda podstawienia

Drugą metodą, którą można realizować przy pomocy komparatora RLC jest metoda podstawienia. W metodzie tej błąd przyrządu nie wpływa na niepewność pomiaru. Ponieważ komparator nie posiada wzorców wewnętrznych, należy podłączyć do niego wzorec o wartości nominalnej takiej samej jak wzorec mierzony, który będzie pełnił funkcję wzorca odniesienia (C_{ref}). Jego dokładna wartość pojemności nie ma znaczenia, ważne jest aby była ona bliska nominalnej i stała w czasie pomiaru. Pomiaru w metodzie podstawienia dokonuje się następująco:

- jako C_2 podłączany jest wzorec odniesienia C_{ref} ,
- jako C_1 podłączany jest wzorec o znanej wartości pojemności elektrycznej,
- do programu komparatora wpisywana jest wartość nominalna pojemności wzorca odniesienia (C_{ref}),
- zadawany jest transfer $C_2 \rightarrow C_1$,
- otrzymujemy wynik porównania C_z ,
- jako C_1 podłączany jest wzorec o nieznanym wartości pojemności elektrycznej,
- zadawany jest transfer $C_2 \rightarrow C_1$,
- otrzymuje się wynik porównania C_n .



Rys. 3. Metoda podstawienia
Fig. 3. The substitution method

Następnie po obliczeniu stosunku uzyskanych wyników dla obu transferów ze wzoru:

$$k = \frac{C_n(1 + \sigma_{sn})}{C_z(1 + \sigma_{sz})} \approx \frac{C_n}{C_z}(1 + \sigma_{sn} + \sigma_{sz}), \quad (7)$$

gdzie σ_{si} oznacza odchylenie standardowe wyników pomiarów i -tego wzorca, należy pomnożyć go przez wartość poprawną wzorca o znanej wartości. Na tej podstawie uzyskiwana jest wartość pojemności elektrycznej wzorca mierzzonego. Przy założeniu, że

$$\sigma_{sn} = \sigma_{sz} = \sigma_s, \quad (8)$$

na mocy dodawania geometrycznego :

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{sn}^2 + \sigma_{sz}^2}, \quad (9)$$

równanie (7) przyjmuje następującą postać:

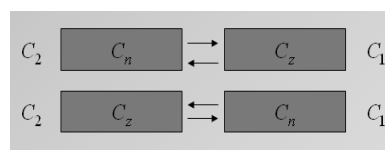
$$k = \frac{C_n}{C_z}(1 + \sqrt{2}\sigma_s), \quad (10)$$

Na tej podstawie niepewność wyznaczenia wartości poprawnej wzorca mierzzonego oszacowana jest na poziomie $\sqrt{2}\sigma_s$.

2.4. Metoda przestawienia

W metodzie przestawienia wzorców miejscami nie jest używany dodatkowy wzorec pełniący rolę wzorca odniesienia. Porównywane pary wzorców stanowią dla siebie nawzajem wzorce odniesienia w kolejnych transferach. Pomiaru w metodzie przestawienia dokonuje się następująco:

- jako C_2 podłączany jest wzorec o nieznanym wartości pojemności elektrycznej C_n ,
- jako C_1 podłączany jest wzorec o znanej wartości pojemności elektrycznej C_z ,
- zadawany jest transfer $C_2 \rightarrow C_1$,
- dokonuje się zamiany wzorców miejscami,
- zadawany jest transfer $C_2 \rightarrow C_1$.



Rys. 4. Metoda przestawienia
Fig. 4. The replacing method

Następnie oblicza się stosunki impedancji k_1 i k_2 dla obu transferów z następujących wzorów:

$$k_1 = \frac{C_n}{C_z}, \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{C_z}{C_n}$$

przy czym stosunki impedancji k_1 i k_2 są równe:

$$R_1 = 1 + \delta_c + \delta_k, \quad (12)$$

$$R_2 = 1 - \delta_c + \delta_k$$

gdzie: δ_c jest odchyleniem stosunku impedancji od wartości 1, natomiast δ_k jest przesunięciem zera komparatora.

Po przekształceniach równań (12) uzyskiwana jest wartość odchylenia stosunku impedancji od wartości 1:

$$\delta_c = \frac{k_1 - k_2}{2}, \quad (13)$$

Dla znanej wartości pojemności C_z uzyskiwana jest wartość poprawna mierzzonego kondensatora C_n ze wzoru:

$$C_n = \left(1 + \frac{k_1 - k_2}{2}\right)C_z, \quad (14)$$

Warto zauważyć, że z końcowego wyniku wyeliminowane zostało przesunięcie zera komparatora. W przypadku tej metody niepewność transferu oszacowana jest na poziomie $\frac{\sigma_s}{\sqrt{2}}$.

Podobną procedurę wykonuje się dla transferu $C_1 \rightarrow C_2$.

3. Wyniki

Przy pomocy opisanych metod przeprowadzono pomiary wzorców stanowiących państwowy wzorzec jednostki miary pojemności elektrycznej (10 pF typu 11A). W październiku 2010 roku trzy kondensatory z grupy były wzorcowane w BIPM. Następnie na podstawie wartości ze świadectw wzorcowania ustalono wartość grupową i wartości poszczególnych elementów grupy.

Następnie wartości te były wykorzystywane jako wartości odniesienia w pomiarach. Dla metody podstawienia i przestawienia każdy element grupy po kolei służył jako C_1 i C_2 i w ten sposób dokonano porównań dla wszystkich kombinacji. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wartości elementów wzorca państwowego pojemności elektrycznej wyznaczone przy użyciu różnych metod oraz wartości z BIPM przy częstotliwości 1 kHz (w pF)

Tab. 1. Values of elements of the national standard of capacitance unit determined by various methods and BIPM values at 1 kHz (in pF)

Numer wzorca	BIPM (2007)	Metoda		
		Grupowa	Podstawienia	Przestawienia
1024	10,00003902	10,0000399	10,0000393	10,00003940
1025	10,00001961	10,0000192	10,0000196	10,00001950
1026	10,00001611	10,0000158	10,0000159	10,00001585
1027	10,00002131	10,0000212	10,0000215	10,00002161
Niepewność rozszerzona	0,04 ppm	0,5 ppm	0,1 ppm	0,07 ppm

Wykonano pomiary elementów termostatyzowanych typu 11A (100 pF) i 1408 (10 pF i 100 pF). Dla wartości 100 pF zastosowano metodę bezpośredniego porównania w stosunku 1:10. Kondensator o wartości 10 pF był podłączony jako C_2 , wpisano wartość poprawną do programu, a następnie wykonywany był transfer na 100 pF. Podobną procedurę przeprowadzono dla każdego z czterech sztuk kondensatorów 10 pF typu 11A stanowiących odniesienie. Następnie uzyskane wyniki uśredniono, otrzymując wartości poprawne kondensatorów 100 pF. Pomiary elementu 10 pF typu 1408 wykonywane były trzema przedstawionymi metodami według takiej samej procedury jak dla dwóch porównywanych kondensatorów typu 11A.

Pomiary elementów nietermostatyzowanych typu 1404 przeprowadzane były w warunkach izolacji termicznej (monitorowane czujnikiem temperatury Pt 100), zapewniając ich stabilizację termiczną na poziomie 0,4 °C. Kondensator o wartości 10 pF był odniesiony do każdego z wzorców typu 11A o wartości 10 pF trzema metodami, kondensator o wartości 100 pF odniesiony do wzorca typu 100 pF typu 11A trzema metodami i do wzorców 10 pF 11A metodą bezpośredniego porównania w stosunku 1:10, a kondensator o wartości 1000 pF odniesiony do kondensatora

100 pF typu 11A metodą bezpośredniego porównania (1:10) w stosunku do wzorca 100 pF typu 11A i wzorca 100 pF typu 1408. Uzyskane wyniki wraz z niepewnościami zostały przedstawione w tabeli 2.

Tab. 2. Wartości wzorców odniesienia wyznaczone przy użyciu różnych metod pomiarowych przy częstotliwości 1 kHz (w pF)

Tab. 2. Values of the reference standards determined by various measurement methods at 1 kHz (in pF)

typ/nr wzorca	Metoda			
	GR1621, AH	Porównania	Podstawienia	Przestawienia
11A/1507	99,9990 ± 0,0002	99,9989 ± 0,0001	-	-
1408/200	10,00003 ± 0,00006	10,00002 ± 0,00002	10,00002 ± 0,00002	10,00002 ± 0,00002
1408/211	100,0004 ± 0,0007	100,0004 ± 0,0002	100,0003 ± 0,0002	100,0004 ± 0,0002
1404-C/3628	10,00010 ± 0,00006	10,00009 ± 0,00003	10,00008 ± 0,00003	10,00009 ± 0,00003
1404-B/951	99,9978 ± 0,0007	99,9977 ± 0,0003	99,9976 ± 0,0003	99,9976 ± 0,0003
1404-A/1123	999,999 ± 0,006	999,996 ± 0,003	-	-

4. Podsumowanie

Z otrzymanych rezultatów wynika, że dzięki zastosowaniu komparatora RLC 2100 w pomiarach elementów państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej, można uzyskać ich wartości z niepewnością kilkukrotnie mniejszą niż przy pomocy stosowanych dotychczas mostków. Głównym czynnikiem wpływającym na niepewność wyznaczenia tych wartości jest niepewność wzorców wyznaczona przez laboratorium referencyjne. Użycie komparatora pozwoliło także na wyznaczenie wartości wzorców odniesienia z niepewnością dwukrotnie mniejszą niż dotychczas. Niepewność ta jest zdeterminowana przede wszystkim niepewnością określenia temperatury wzorców, która wynika z braku odpowiedniego termostatu.

5. Literatura

- [1] Surdu M., Lameko A., Tarłowski A., Rzepakowski R.: Utworzenie optymalnej bazy wzorców w dziedzinie pomiaru parametrów impedancji zespolonych, Pomiary Automatyka Robotyka 9/2007.
- [2] Surdu M., Lameko A., Karpov I., Klonz M., Koffman A., Kinard J., Tarłowski A.: Bridges for the realization of the units and build-up of the scale for electrical resistance, capacitance and inductance., Konferencja CPEM 2006, Turyn, str. 520-52.
- [3] Jursza J., Koszarny M., Ziółek A.: Odtwarzanie jednostki miary indukcyjności z wykorzystaniem komparatora RLC przy częstotliwości 1 kHz, Pomiary Automatyka Kontrola 9/2010, str. 997-999.

otrzymano / received: 25.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacja redakcji dotycząca artykułów współautorskich

W miesięczniku PAK od numeru 06/2010 w nagłówkach artykułów współautorskich wskazywany jest autor korespondujący (Corresponding Author), tj. ten z którym redakcja prowadzi wszelkie uzgodnienia na etapie przygotowania artykułu do publikacji. Jego nazwisko jest wyróżnione drukiem pogrubionym. Takie oznaczenie nie odnosi się do faktycznego udziału współautora w opracowaniu artykułu. Ponadto w nagłówku artykułu podawane są adresy korespondencyjne wszystkich współautorów.

Wprowadzona procedura wynika z międzynarodowych standardów wydawniczych.