

Jolanta JURSA, Maciej KOSZARNY, Adam ZIÓŁEK

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

## Odtwarzanie jednostki miary indukcyjności z wykorzystaniem komparatora *RLC*, przy częstotliwości 1 kHz

Mgr inż. Jolanta JURSA

Jest głównym metrologiem w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Zakładu Elektrycznego w Głównym Urzędzie Miar. Jest opiekunem państwowego wzorca jednostki miary indukcyjności i zajmuje się pomiarami w dziedzinie pojemności elektrycznej i indukcyjności oraz udoskonalaniem metod szacowania niepewności.

e-mail: [impedance@gum.gov.pl](mailto:impedance@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: [impedance@gum.gov.pl](mailto:impedance@gum.gov.pl)

Mgr inż. Adam ZIÓŁEK

Jest 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 i indukcyjności oraz doskonalą metody analizy wyników pomiarów.

e-mail: [impedance@gum.gov.pl](mailto:impedance@gum.gov.pl)

### 1. Wstęp

W Głównym Urzędzie Miar, w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych przechowywany jest państwowy wzorzec indukcyjności. Stanowi go grupa czterech cewek indukcyjnych typu 1482-H, firmy General Radio, o wartości nominalnej 10 mH, umieszczonych w powietrznym termostacie stacjonarnym (rys. 1). Laboratorium posiada również grupy wzorców odniesienia.



Rys. 1. Państwowy wzorzec indukcyjności  
Fig. 1. National standard of inductance unit

Wartością poprawną wzorca państwowego jest wartość średnia indukcyjności z wartości poszczególnych elementów grupy.

Wzorce te są okresowo wzorcowane w jednym z laboratoriów uznanych za referencyjne (NPL w Wielkiej Brytanii lub PTB w Niemczech).

Wzorcowanie jest procesem długotrwałym, wymagającym czasu na ustalanie się charakterystyk metrologicznych wzorców. Warunki termiczne, występujące podczas transportu mogą w sposób trwały zmienić wartość wzorca, co wpływa niekorzystnie na niepewność związaną z wyznaczoną wartością poprawną.

Jednym z rozwiązań może być zastąpienie termostatu stacjonarnego termostatami indywidualnymi dla każdego wzorca z grupy, z możliwością ich bateryjnego zasilania podczas transportu. Jednak metodą radykalnie zmieniającą podejście do odtwarzania jednostki indukcyjności jest jej odtwarzanie na podstawie wzorców i przyrządów dostępnych w laboratorium, bez pośrednictwa laboratoriów referencyjnych.

### 2. Metody pomiarowe

Pomiar indukcyjności może być wykonywany na kilka sposobów. Jednym z nich jest pomiar indukcyjności w odniesieniu do wzorca pojemności elektrycznej. W laboratorium od lat 80-tych do takich pomiarów stosowany był komparator L-C, wykonany na Politechnice Wrocławskiej, pod kierunkiem prof. Andrzeja Mućka [1, 2]. Komparator ten ma ograniczony zakres pomiarowy oraz dość skomplikowaną procedurę uzyskiwania wyniku, dlatego do pomiarów stosowano również mostek cyfrowy typu 1689M.

Od roku 2007, w laboratorium przeprowadzane są pomiary indukcyjności z wykorzystaniem automatycznego systemu przeno-

### Streszczenie

Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych GUM posiada kilka zestawów wzorców odniesienia, z których wybrane elementy są wzorcowane w laboratoriach referencyjnych. Laboratorium doskonalą swoje metody pomiarowe poprzez powiązanie ze sobą wielkości elektrycznych i uzyskiwanie jak najdokładniejszych wyników pomiarów. Przy użyciu automatycznego komparatora *RLC* istnieje możliwość odtworzenia jednostki indukcyjności za pośrednictwem wzorca jednostki pojemności elektrycznej. Dzięki zastosowaniu systemu *RLC* laboratorium będzie mogło ograniczyć ilość wzorcowań w laboratoriach referencyjnych, a jednocześnie częściowo wyeliminować niepożądany wpływ transportu na wzorce. Stabilność temperatury wzorców jest kluczowym składnikiem niepewności, mającym istotny wpływ na najlepszą możliwość pomiarową, dlatego kolejnym etapem rozwoju laboratorium będzie wyposażenie wzorców w indywidualne termostaty.

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

### Realization of the inductance unit using *RLC* comparator at 1 kHz

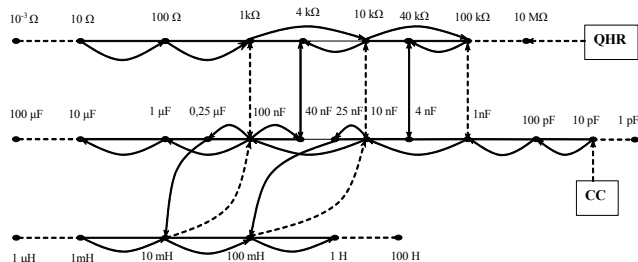
#### Abstract

The Electrical Quantity Standards Laboratory of the Central Office of Measures has several sets of standards. Some of them are calibrated in reference laboratories. The measurement methods used in the laboratory are improved by making relations between electrical quantities in order to obtain the most accurate measurement results. Due to use of an automatic *RLC* comparator, it is possible to obtain the relation between inductance and capacitance units. The *RLC* system in the laboratory will enable limiting the number of calibrations in reference laboratories and, partially, eliminating an undesirable transportation impact on the standards. The standard temperature stability is the main component of the uncertainty which influencing essentially the measurement capabilities, so the next stage of laboratory development will be equipping the standards with individual thermostats. The measurement results of 1482-L-type inductance standards of 100 mH nominal values confirmed that the *RLC* comparator of type 2100 is a device which allows the optimisation of measurements.

**Keywords:** calibration, inductance, capacitance, *RLC* comparator.

szenia jednostek  $R$ ,  $C$  i  $L$ . Jest to system  $RLC$  typu 2100, składający się z dwóch komparatorów: sinusoidalnego (współfazowo - przeciwfazowego) oraz kwadraturowego, które umożliwiają przeniesienie 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 (rys. 2):



Rys. 2. Schemat przekazywania wartości jednostek parametrów impedancji zespolonych. Ciągłe linie dotyczą przekazania  $C$ - $R$  oraz  $C$ - $L$  przy częstotliwości 1 kHz, przerywane, przy częstotliwości 1,592 kHz. QHR - wzorzec rezystancji oparty na kwantowym efekcie Halla, CC – kondensator obliczeniowy  
 Fig. 2. Diagram of the transmission units of complex impedance parameters. Continuous lines concern the transfer of  $C$ - $R$  and  $C$ - $L$  at 1 kHz, at frequency 1,592 kHz are shown by dotted lines. QHR-quantum Hall Resistor, CC – calculable capacitor



Rys. 3. System  $RLC$  i zestaw wzorców  $C$  i  $R$   
 Fig. 3.  $RLC$  system and a set of the  $C$  and  $R$  standards

Laboratorium posiada zestaw termostatyzowanych wzorców pojemności i rezystancji CA-5200RC, dla których zapewnione jest utrzymanie temperatury ze stałością ok. 0,002 °C/dobę (rys. 3) oraz przyrządy pomiarowe o wysokiej dokładności, pozwalające na wyznaczenie wartości poprawnych tych wzorców z odpowiednio małą niepewnością pomiaru, dlatego możliwości systemu  $RLC$  są szczególnie cenne przy przeniesieniu jednostki indukcyjności w oparciu o pojemność elektryczną.

System  $RLC$  umożliwia przeprowadzanie porównań przy częstotliwościach 1,592 kHz i 1 kHz. Przekazywanie jednostki  $C \rightarrow L$  przy częstotliwości 1 kHz, wykonywane jest od wzorców pojemności z przedziału 2,5 nF ÷ 250 nF do wzorców indukcyjności 10 mH ÷ 1 H, przy wykorzystaniu komparatora sinusoidalnego.

Tab. 1. Punkty przeniesienia jednostki  $C$ - $L$   
 Tab. 1. Points of  $C$ - $L$  unit transfer

Przeniesienie jednostki	$C \rightarrow L$	
	1 kHz	1,592 kHz
Częstotliwość	2,5 nF → 1 H	1 nF → 1 H
Punkty przeniesienia	25 nF → 100 mH	10 nF → 100 mH
	250 nF → 10 mH	100 nF → 10 mH

Wzorce jednostek wielkości fizycznych rozpatrywane są jako impedancje zespolone, pomiędzy którymi zachodzi wzajemne powiązanie, wyznaczone za pomocą wzorca częstotliwości. Istnieje możliwość porównywania parametrów niejednorodnych wzorców. Odbywa się ono przy pomocy wzoru:

$$Z_x = f(\alpha, \beta, Z_0) \tag{1}$$

gdzie  $\alpha$  i  $\beta$  są parametrami mierzonymi, natomiast  $Z_0$  impedancją wzorca dowolnego parametru impedancji zespolonej. Rodzaj funkcji  $f$  zależy od mierzonych parametrów i schematu zastępczego mierzonej impedancji. Przyjmujemy że:

$$Z_x = (\alpha + j\beta_x)Z_0 \tag{2}$$

Jeśli wzorce nie mają charakteru wyłącznie rezystancyjnego lub reaktancyjnego, do wyznaczenia dowolnych parametrów impedancji wystarczające jest dysponowanie jedynie dwoma wzorcami parametrów: głównego (wzorca o charakterze rezystancyjnym  $R_0$  lub pojemnościowym  $C_0$ ) i dopełniającego (wzorca kąta stratności  $\text{tg}\delta$  lub kąta fazowego  $\text{tg}\varphi$ ). Gdy mierzonym elementem jest cewka indukcyjna z impedancją określoną wzorem:

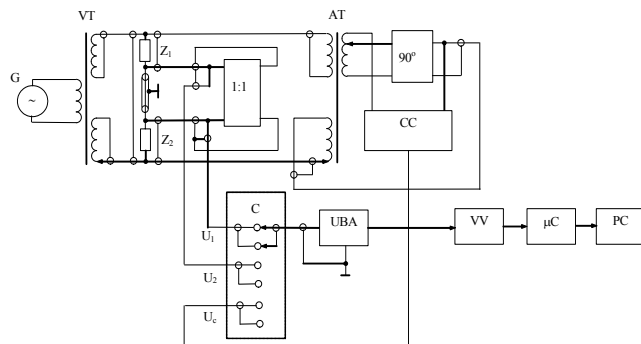
$$Z_x = j\omega L_x + R_x \tag{3}$$

gdzie  $L_x$  jest indukcyjnością, a  $R_x$  rezystancją mierzonej cewki, wówczas powiązanie  $C \rightarrow L$  odpowiada klasycznemu układowi odtwarzania jednostki indukcyjności z jednostki pojemności i częstotliwości zgodnie z równaniem:

$$L_x = \frac{\beta}{\omega^2 C_0} \tag{4}$$

a tangens kąta stratności  $\text{tg}\delta$  może być określony za pomocą stosunku wartości mierzonych parametrów  $\alpha$  i  $\beta$ .

Wynika z tego, że zamiast wzorca indukcyjności można zastosować wzorce pojemności i częstotliwości [3].



Rys. 4. Komparator sinusoidalny wzorców impedancji  
 Fig. 4. Sinusoidal comparator of impedance standards

System  $RLC$  stanowi generator napięcia sinusoidalnie zmiennego  $U_0$ , komparator kwadraturowy oraz sinusoidalny, obwód kalibracji i woltmierz wektorowy. System sterowany jest przy pomocy komputera klasy PC. W przypadku porównania ze sobą wzorca o charakterze reaktancyjnym z wzorcem rezystancji wykorzystywany jest komparator kwadraturowy. W tym przypadku pozwala on na wyznaczenie wartości impedancji mierzonej  $Z_x$  oraz jej parametrów w odniesieniu do wzorca rezystancji, dzięki wykorzystaniu w konstrukcji komparatora układów generujących napięcia testowe, przesunięte o kąt  $\pi/4$ . Za dokładność generowania napięć odpowiada układ kalibracji. Pozwala on na wyznaczenie poprawek związanych ze zmianami fazy napięć w układzie oraz amplitudy generowanego napięcia.

W przypadku porównań wartości elementów o charakterze zblizonym 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 woltmierz cyfrowy.

Tab. 2. Charakterystyka techniczna komparatora sinusoidalnego  
Tab. 2. Technical characteristic of the sinusoidal comparator

Częstotliwość pracy	1 kHz, 1,592 kHz
Przedział porównywanych impedancji dla:	
pojemności elektrycznej	$10^{-7}$ nF ÷ 10 F
rezystancji	$10^{-7}$ Ω ÷ 10 TΩ
indukcyjności	$10^{-11}$ H ÷ 10 MH
tangensa kąta stratności lub tangensa kąta fazowego	$10^{-6}$ ÷ $10^6$

Błędy porównania parametru głównego w przedziałach podstawowych wynoszą poniżej 0,0001 %.

Niepewność przenoszenia jednostki  $C \rightarrow L$  jest mniejsza niż  $10 \times 10^{-6}$ . Wartości poprawne wykorzystywanych wzorców pojemności wyznaczane są tuż przed dokonywaniem operacji przenoszenia jednostki, z wykorzystaniem precyzyjnego mostka  $C$ .

### 3. Wyniki

Po wzorcowaniu cewek indukcyjnych o wartościach nominalnych 10 mH, 1 mH, 100 mH i 1 H w PTB w 2005 roku, wyznaczono wartości odpowiednich grup wzorców ( $L_{gr}$ ) dla 1 kHz, które przyjęto następnie jako stałe. To pozwala wyznaczać wartości poszczególnych wzorców indukcyjności ( $L_s$ ), przy wykorzystaniu metody wzorca grupowego, przez okresowe wzorcowanie w GUM. W tabeli 3 przedstawiono przykładowe porównanie wartości poprawnych, dla dwóch wzorców indukcyjności o wartościach nominalnych 100 mH, uzyskanych z metody wzorca grupowego (odniesienie do wzorcowania wzorca w PTB) oraz z pomiarów na komparatorze sinusoidalnym.

Tab. 3. Wartości poprawne wzorców indukcyjności wyznaczone różnymi metodami pomiarowymi dla 1 kHz

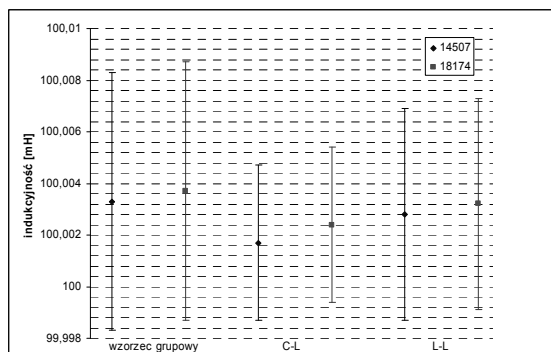
Tab. 3. Correct values of reference standards obtained from various measurement methods at 1 kHz

Metoda pomiaru	Nr wzorca	
	14507	18174
metoda wzorca grupowego mH	100,0033 ± 0,0050	100,0037 ± 0,0050
z przeniesienia $C \rightarrow L$ mH	100,0017 ± 0,0030	100,0024 ± 0,0030
z przeniesienia $L \rightarrow L$ mH	100,0028 ± 0,0041	100,0032 ± 0,0041



Rys. 5. Układ pomiarowy z wykorzystaniem systemu RLC typu 2100  
Fig. 5. Measurement system using the RLC system of type 2100

Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 6:



Rys. 6. Wyniki wartości poprawnych otrzymanych różnymi metodami pomiarowymi  
Fig. 6. Results of the correct values obtained from various measurement methods

W maju 2007 roku laboratorium wzięło udział w międzynarodowym porównaniu wzorców indukcyjności 100 mH EUROMET EM.S26. W czasie pomiarów wykorzystywano m.in. system  $RLC$ , korzystając z możliwości wyznaczenia indukcyjności na podstawie pojemności elektrycznej oraz wzorców odniesienia indukcyjności. W laboratorium niepewność względna pomiaru została oszacowana na poziomie  $36 \times 10^{-6}$ .

Wg wstępnego raportu, laboratorium uzyskało wynik różniący się jedynie o około  $7 \times 10^{-6}$  od wyniku odniesienia, wskaźnik  $E_n = -0,1$ , czym potwierdziło swoje kompetencje techniczne i zadeklarowane możliwości pomiarowe z bardzo dobrym rezultatem. Jednocześnie uzyskało potwierdzenie danych przyrządu deklarowanych przez producenta systemu  $RLC$ .

Wartość 100 mH odtwarzana była z kondensatora z zestawu CA-5200RC o wartości 25000 pF z dołączoną wartością 333 pF z dekady typu 1413, której niepewność była na poziomie znacznie wpływającym na wartość całkowitej niepewności odtwarzania jednostki pojemności. Dzięki zastosowaniu kondensatorów ceramicznych o zerowym współczynniku temperaturowym (NP0, COG) wartość 333 pF uzyskana została z niższą niepewnością w porównaniu z przyjętą w komparacji.

Tab. 4. Wartości poprawne wzorców biorących udział w komparacji EUROMET EM.S26 prowadzonego przez laboratorium PTB.

Tab. 4. Correct values of standards participating in EUROMET EM.S26 comparison conducted by PTB laboratory.

Nr wzorca odniesienia	Wartość poprawna wzorca odniesienia wg PTB po uwzgl. dryftu wzorca mH	Wartość poprawna wzorca odniesienia wg GUM (po uwzgl. dryftu przez PTB) mH
13975	100,05611 ± 0,00079	100,05545 ± 0,00362
18197	100,04169 ± 0,00093	100,04100 ± 0,00365

### 4. Podsumowanie

Prezentowano wyniki pomiarów wzorców indukcyjności typu 1482-L o wartości nominalnej 100 mH dla 1 kHz, otrzymane przy pomocy różnych metod pomiarowych. Potwierdziły one, że komparator  $RLC$ , typ 2100 jest urządzeniem umożliwiającym optymalizację pomiarów. Laboratorium prowadzi dalsze badania, które mają na celu uzyskanie coraz niższych wartości niepewności pomiaru. Dzięki zastosowaniu systemu  $RLC$ , laboratorium będzie mogło ograniczyć ilość wzorcowań w laboratoriach referencyjnych, a jednocześnie częściowo wyeliminować niepożądany wpływ transportu na wzorce. Stabilność temperatury wzorców jest kluczowym składnikiem niepewności, mającym istotny wpływ na najlepszą możliwość pomiarową, dlatego kolejnym etapem rozwoju laboratorium, będzie wyposażenie wzorców w indywidualne termostaty.

W planach naszego laboratorium jest realizacja przekazywania jednostki  $R - C$ , z wykorzystaniem państwowego wzorca oporu elektrycznego, co zapewne znacznie poprawi niepewność pomiaru wzorca pojemności elektrycznej.

### 5. Literatura

- [1] Muciek A.: A Combined Transformer Bridge for Precise Comparison of Inductance with Capacitance., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM32, No 3, September 1983, pp. 419-422.
- [2] Muciek A., Jursza J., Rzepakowska J., Tarłowski A.: Precyzyjna komparacja wzorców indukcyjności z wzorcami pojemności za pomocą mostka transformatorowego., Materiały Konferencji PPM'05, str. 45-52.
- [3] Surdu M., Lameko A., Tarłowski A., Rzepakowski R.: Utworzenie optymalnej bazy wzorców w dziedzinie pomiaru parametrów impedancji zespolonych., Pomiary Automatyka Robotyka 9/2007.
- [4] 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. 520-521.

otrzymano / received: 03.07.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany