

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

Jolanta Jursza, Maciej Koszarny, Adam Ziółek

Główny Urząd Miar, Zakład Elektryczny, Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych

Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych GUM posiada kilka zestawów wzorców odniesienia, z których wybrane elementy są wzorcowane w laboratoriach referencyjnych. Laboratorium doskonali 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.

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

The Electrical Quantities Standards Laboratory of the Central Office of Measures has several sets of standards. Some of them are calibrated in reference laboratories. The Laboratory improves measurement methods by establishing relationships between standards of electrical quantities and obtains the most accurate measurement results. By using an automatic *RLC* comparator, it is possible to obtain the relation between inductance and capacitance units. With the *RLC* system, the laboratory will be able to limit the number of calibrations in reference laboratories and partially eliminate the undesirable transportation impact on the standards. The instability of temperature of standards is the main source of uncertainty which affects the best measurement capabilities. Therefore, in the next stage of the laboratory development, the standards will be equipped with individual thermostats. The measurement results of inductance standards 1482-L-type with nominal values of 100 mH confirmed that the *RLC* comparator type 2100 is a device which allows the optimization of measurements.

## 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. Laboratorium posiada również grupy wzorców odniesienia. Wzorce te są okresowo wzorcowane w jednym z laboratoriów uznanych za referencyjne (NPL w Wielkiej Brytanii lub PTB w Niemczech).

Wartością poprawną wzorca państwowego jest wartość średnia indukcyjności z wartości poszczególnych elementów grupy. 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. Komparator ten ma ograniczony zakres pomiarowy oraz dosyć 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 przenoszenia jednostek  $R$ ,  $C$  i  $L$ . Jest to system  $RLC$  typu 2100, składający się z dwóch komparatorów: sinusoidalnego (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.

Laboratorium posiada zestaw termostatyzowanych wzorców pojemności i rezystancji CA-5200RC, dla których zapewnione jest utrzymanie temperatury ze stałością ok. 0,002 °C/dobę 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 przenoszeniu 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. System  $RLC$  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 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.

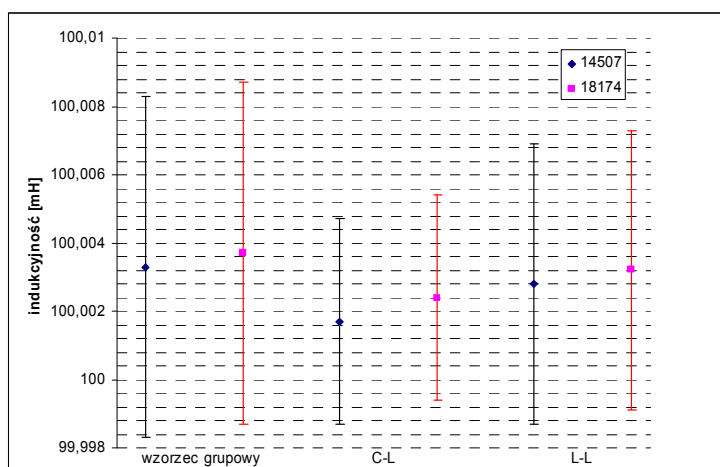
W przypadku porównań wartości elementów o charakterze zbliżonym do reaktancyjnego wykorzystywany jest komparator sinusoidalny. Układ ten stanowi mostek transformatorowy, który może pracować w konfiguracji synfazowej (porównanie  $C-C$ ,  $L-L$ ) jak i w układzie przeciwfazowym (porównanie  $C-L$ ).

Równoważenie komparatorów sterowane jest komputerowo. Detektorem równowagi w przypadku systemu  $RLC$  jest wspólny dla obu komparatorów wektorowy woltomierz cyfrowy. Błędy porównania parametru głównego w przedziałach podstawowych wy-

noszą poniżej 0,0001 %. Niepewność przenoszenia jednostki  $C \rightarrow L$  jest mniejsza niż  $10 \times 10^{-6}$ . Wartości poprawne wykorzystywanych wzorców pojemności wyznaczone są tuż przed dokonywaniem operacji przenoszenia jednostki, z wykorzystaniem precyzyjnego mostka C.

### 3. Wyniki

Po wzorcowaniu cewek indukcyjnych o wartościach nominalnych 1 mH, 10 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. Na rysunku 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.



Rys. 1. Wyniki wartości poprawnych otrzymanych różnymi metodami pomiarowymi

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  $36 \times 10^{-6}$ .

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

Wartość 100 mH odtwarzana była z kondensatora z zestawu CA-5200RC o wartości 25 000 pF z dołączoną wartością 333 pF z dekady, której niepewność była na poziomie znacznie wpływającym na wartość całkowitej niepewności odtwarzania jednostki pojemności. Dzięki zastosowaniu kondensatorów ceramicznych o zerowym współczynniku temperaturowym (NP0, C0G), wartość 333 pF uzyskana została z niższą niepewnością w porównaniu z przyjętą w komparacji.

## 4. Podsumowanie

Przedstawiono 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.

## Literatura

- [1] A. Muciek: *A Combined Transformer Bridge for Precise Comparison of Inductance with Capacitance*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM32 (1983), s. 419-422.
- [2] A. Muciek, J. Jursza, J. Rzepakowska, A. Tarłowski: *Precyzyjna komparacja wzorców indukcyjności z wzorcami pojemności za pomocą mostka transformatorowego*. Materiały Konferencji PPM'05, s. 45-52.
- [3] M. Surdu, A. Lameko, A. Tarłowski, R. Rzepakowski: *Utworzenie optymalnej bazy wzorców w dziedzinie pomiaru parametrów impedancji zespolonych*. PAR nr 9 (2007).
- [4] M. Surdu, A. Lameko, I. Karpov, M. Klonz, A. Koffman, J. Kinard, A. Tarłowski: *Bridges for the realization of the units and build-up of the scale for electrical resistance, capacitance and inductance*. Konferencja CPEM 2006, Turyn, s. 520-521.