

## Państwowy wzorzec jednostki miary indukcyjności

Państwowy wzorzec jednostki miary indukcyjności jest układem pomiarowym składającym się z grupy czterech cewek indukcyjnych wzorcowych typu 1482-H (umieszczonych w termostacie), produkcji General Radio, o wartości nominalnej indukcyjności 10 mH oraz z precyzyjnych przyrządów pomiarowych: komparatora KWL, komparatora  $L$ - $C$  i systemu mostków  $RLC$ .



Wzorce indukcyjności 10 mH w termostacie

Wartością poprawną wzorca jest wartość średnia indukcyjności grupy czterech cewek wzorcowych, traktowana jak wartość grupowa, wyznaczona przy częstotliwości 1 kHz

$$L_{gr} = 0,25 (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)$$

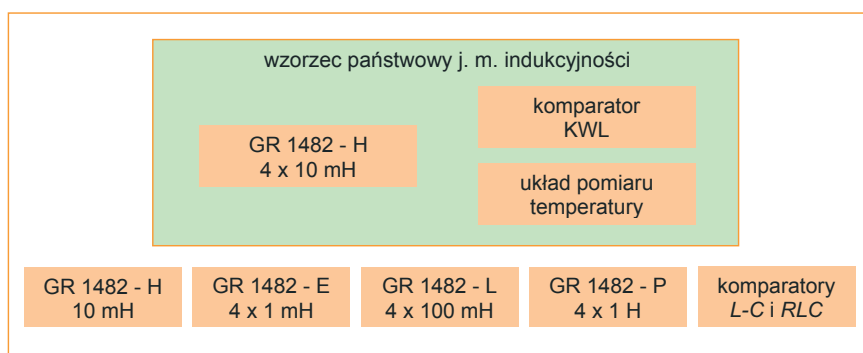
gdzie  $L_1, L_2, L_3, L_4$  są wartościami indukcyjności elementów wzorca grupowego. Wartość ta określana jest na podstawie wyników okresowego wzorcowania przynajmniej dwóch wzorców z grupy w laboratorium odniesienia w PTB lub NPL oraz wyników wzajemnego porównywania wszystkich czterech cewek w GUM.

Zakłada się, że wartość grupowa jest niezmienna w czasie, między kolejnymi wzorcowaniami. Przyjmuje się, że w ustalonych warunkach otoczenia zmiany wartości poszczególnych wzorców indukcyjności są stochastyczne i niezależne względem siebie, a średnia wartość zmiany wynosi zero.

W okresie pomiędzy wzorcowaniami w laboratorium odniesienia przeprowadza się wzajemne komparacje wzorców, polegające na porównywaniu między sobą czterech cewek indukcyjnych wzorcowych we wszystkich możliwych kombinacjach i określaniu wartości ich indukcyjności w odniesieniu do stałej wartości  $L_{gr}$ . Procedura taka pozwala na obserwację stabilności cewek indukcyjnych wzorcowych i jest najbardziej istotna z punktu widzenia kontroli państwowego wzorca jednostki miary.

Wzorce indukcyjności, wchodzące w skład wzorca państwowego, umieszczone są w termostacie powietrznym, w którym temperatura utrzymywana jest na poziomie 23 °C. Panel sterujący umożliwia wybór temperatury wewnątrz termostatu: 16 °C, 20 °C, 23 °C lub 26 °C. Zmienność temperatury wynosi  $\pm 0,05$  °C/rok oraz  $\pm 0,01$  °C/dobę, przy temperaturze otoczenia  $(23 \pm 1)$  °C. Temperatura wewnątrz termostatu kontrolowana jest przez pomiar rezystancji czujników platynowych Pt100, miernikiem typu 2010 firmy Keithley (z funkcjami pomiaru temperatury i rezystancji) oraz precyzyjnym multimetrem cyfrowym typu 7081, firmy Solartron, z funkcją pomiaru rezystancji. Multimetry służą również do pomiaru rezystancji cewek indukcyjnych przy napięciu stałym.

Cewki indukcyjne wzorcowe firmy General Radio typu 1482-H charakteryzują się bardzo dobrą stabilnością. Badania własne prowadzone od 1979 roku wykazują, że względna zmiana wartości indukcyjności w ciągu roku nie przekracza 0,001 %, (według danych producenta zmiany te nie powinny przekraczać 0,01 %). Względna zmiana wartości indukcyjności cewek indukcyjnych, przy zmianie temperatury otoczenia o 1 °C, nie przekracza  $40 \cdot 10^{-6}$ .



Części składowe państwowego wzorca indukcyjności oraz grupy wzorców odniesienia

Uzupełnieniem wzorca państwowego są wzorce odniesienia, służące do przenoszenia jednostki miary indukcyjności oraz przyrządy do nadzoru warunków otoczenia. Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych posiada trzy grupy po cztery sztuki wzorców odniesienia, typu 1482, produkcji General Radio, o wartościach nominalnych: 1 mH, 100 mH oraz 1 H.

Komparator KWL jest urządzeniem pomiarowym wysokiej dokładności, przeznaczonym do wzajemnego porównania cewek wzorca grupowego. Umożliwia on pomiar różnic składowych impedancji dwu porównywanych wzorców.



Komparator KWL

Podstawowe dane techniczne:

- indukcyjność nominalna porównywanych wzorców: 1 mH lub 10 mH
- częstotliwość pomiarowa: 1000 Hz
- zakresy mierzonej różnicy indukcyjności:  $\pm 20 \mu\text{H}$
- zakresy mierzonej różnicy rezystancji szeregowej:  $\pm 400 \text{ m}\Omega$
- rozdzielczość pomiaru różnicy indukcyjności:  $\pm 1 \text{ nH}$
- rozdzielczość pomiaru różnicy rezystancji:  $\pm 20 \mu\Omega$
- maksymalny błąd pomiaru różnicy indukcyjności:  $\pm 10 \text{ nH}$
- maksymalny błąd pomiaru różnicy rezystancji:  $\pm 0,5 \text{ m}\Omega$

Komparator ma wbudowany interfejs do współpracy z komputerem. Multiplexer elektroniczny, umieszczony na obudowie termostatu, zapewnia przyłączanie do komparatora KWL poszczególnych par wzorców, znajdujących się wewnątrz termostatu. Oprogramowanie pozwala na sterowanie multiplexerem oraz zbieranie i opracowywanie wyników pomiarów.

Komparator *L-C* przeznaczony jest do wyznaczania wartości indukcyjności cewek wzorcowych w odniesieniu do wartości wzorca pojemności elektrycznej, zarówno w układzie dwu jak i trójzaciśkowym. Cewki indukcyjne wzorcowe o wartościach nominalnych 10 mH, 100 mH oraz 1 H odnoszone są do kondensatora o pojemności  $C$  równej 10 nF lub 20 nF.

Komparator pracuje przy częstotliwościach: 300 Hz, 800 Hz, 1 kHz, 1,6 kHz. Błąd wyznaczenia wartości indukcyjności przy częstotliwości 1 kHz nie przekracza 0,005 % pod warunkiem, że pojemność elektryczna, do której jest odnoszona wartość indukcyjności oraz główna przekładnia określone są z błędem mniejszym niż 0,001 % i uwzględnione są poprawki na parametry pasożytnicze. Jest to przyrząd regulowany ręcznie, wymagający długotrwałego dobierania nastaw oraz czasochłonnych obliczeń.



Komparator *L-C*



System mostków *RLC*

W pełni automatycznym przyrządem jest system mostków (komparator) *RLC*, typu 2100, produkcji Ukraińskiego Instytutu Metrologii, który jest precyzyjnym przyrządem pomiarowym, przeznaczonym do: (1) odtwarzania jednostki miary pojemności na podstawie parametrów impedancji i częstotliwości; (2) odtwarzania jednostki miary indukcyjności na podstawie pojemności elektrycznej i częstotliwości oraz do (3) automatycznego porównywania wzorców indukcyjności  $L$ , pojemności elektrycznej  $C$ , rezystancji  $R$ , kąta stratności  $\text{tg}\delta$  (współczynnik dobroci  $Q_R$ ) oraz fazy  $\text{tg}\varphi$  (współczynnik dobroci  $Q_C$  i  $Q_L$ ).

- System składa się z dwóch mostków–komparatorów:
- autotransformatorowego (sinusoidalnego), który jest stosowany do przenoszenia jednostki  $C-L$  i komparacji jednorodnych parametrów impedancji,
  - kwadraturowego, który jest stosowany do przenoszenia jednostki  $R-C$  i komparacji parametrów wzorców pojemności i rezystancji.

System komparatorów porównuje wartości impedancji wzorców pierwotnych przy częstotliwościach 1 kHz i 1,592 kHz. System ten wyposażony jest w port szeregowy RS-232, zapewniające zdalne sterowanie i transmisję danych do komputera z oprogramowaniem, umożliwiając zapamiętywanie odczytów i parametrów oraz wyświetlanie wyników pomiaru.

Odtwarzanie i przenoszenie jednostek  $C-L$

Punkty przenoszenia jednostki przy częstotliwości 1,592 kHz:

- 1 nF – 1 H,
- 10 nF – 100 mH,
- 100 nF – 10 mH.

Punkty przenoszenia jednostki przy częstotliwości 1 kHz:

- 2,5 nF – 1 H,
- 25 nF – 100 mH,
- 250 nF – 10 mH.

Niepewność względna przenoszenia jednostki  $C-L$  jest mniejsza niż  $10^{-5}$ . Komparator umożliwia porównywanie wzorców indukcyjności o stosunku wartości 1:1 i 1:10 przy niepewności względnej mniejszej niż  $10^{-6}$ .

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

System mostków  $RLC$  pozwala na odtwarzanie w GUM jednostki miary indukcyjności, z pominięciem zagranicznych laboratoriów, przy zachowaniu odpowiedniej niepewności. Z uwagi na duży współczynnik temperaturowy wzorców indukcyjności (około  $40 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), bardzo ważna jest ich stabilizacja termiczna. Obecnie stosowany termostat mieści cztery wzorce. Jego system zacisków, wraz z multiplekserem, dostosowany jest do pomiarów komparatorem KWL, pozwalając na wybór mierzonej pary wzorców.

System mostków  $RLC$  umożliwia wyznaczanie wartości poprawnych pojedynczych wzorców. Ze względu na obecny układ zacisków konieczne jest wyjmowanie wzorców z termostatu, co zwiększa niepewność pomiaru. Celowa byłaby zatem stabilizacja termiczna każdego wzorca z osobna. Termostaty indywidualne, z możliwością zasilania baterijnego, byłyby również doskonałym rozwiązaniem w przypadku przewozu wzorców do laboratorium zagranicznego, np. w trakcie porównań międzylaboratoryjnych. Ich zastosowanie pozwoliłoby również na wyeliminowanie wpływów multipleksera wprowadzającego dodatkowe oraz niepowtarzalne rezystancje szeregowo styków.

*Jolanta Jursza i Maciej Koszarny*  
*Zakład Elektryczny*