

Ryszard RYBSKI¹, Janusz KACZMAREK¹, Mirosław KOZIOŁ¹, Krzysztof MUSIOŁ²,
Marian KAMPIK², Adam ZIÓŁEK³, Jolanta JURSZĄ³

¹Uniwersytet Zielonogórski

Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki

²Politechnika Śląska

Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki

³Główny Urząd Miar

Zakład Elektryczności i Promieniowania

CHARAKTERYSTYKA CYFROWYCH MOSTKÓW IMPEDANCJI W TRÓJSTRONNYCH PORÓWNANIACH WZORCÓW

W pracy scharakteryzowano dwa typy cyfrowych mostków impedancji oraz wzorców impedancji opracowanych i rozwijanych w związku z realizacją projektu badawczego, którego celem są trójstronne porównania prowadzone przez Uniwersytet Zielonogórski, Politechnikę Śląską i Główny Urząd Miar.

CHARACTERIZATION OF DIGITAL IMPEDANCE BRIDGES IN TRILATERAL COMPARISONS OF STANDARDS

This paper describes two types of digital impedance bridges and impedance standards developed as part of a research project aimed at conducting trilateral comparisons carried out by the University of Zielona Góra, the Silesian University of Technology and the Central Office of Measures.

1. WPROWADZENIE

W łańcuchu porównań wzorców impedancji stosowane są obecnie, obok klasycznych układów opartych na elementach o silnym sprzężeniu magnetycznym, cyfrowe mostki impedancji nowej generacji. Są to mostki bazujące na wykorzystaniu złączy Josephsona (mostki Josephsona, mostki kwantowe) oraz w pełni cyfrowe mostki wykorzystujące najnowsze osiągnięcia z obszaru technologii przetworników A/C i C/A (mostki elektroniczne). Te ostatnie są znacznie tańsze w budowie i eksploatacji, dodatkowo pozwalają na porównania impedancji o stosunku leżącym w całej płaszczyźnie zespolonej i z tych powodów są przedmiotem zaawansowanych badań prowadzonych głównie przez wiodące NMIs. Publikacje z ostatnich lat wskazują, że mostki elektroniczne mogą być stosowane w porównaniach wzorców o najwyższej dokładności [1].

W kraju badania w obszarze metrologii impedancyjnej najwyższych dokładności związane z w pełni cyfrowymi mostkami elektronicznymi nowej generacji prowadzone są od wielu lat przez zespoły badawcze z Uniwersytetu Zielonogórskiego (Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki - IMEI) i Politechniki Śląskiej (Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki - KMEiA) w ścisłej współpracy z Głównym Urzędem Miar w Warszawie (GUM). Wymiernym efektem tej współpracy jest realizowany wspólnie projekt^a, którego głównym celem jest zwiększenie możliwości pomiarowych GUM w zakresie realizacji państwowych wzorców impedancji poprzez zapewnienie ich spójności pomiarowej w odniesieniu do wzorca opartego na kwantowym efekcie Halla DCQHR.

2. CYFROWE MOSTKI IMPEDANCJI

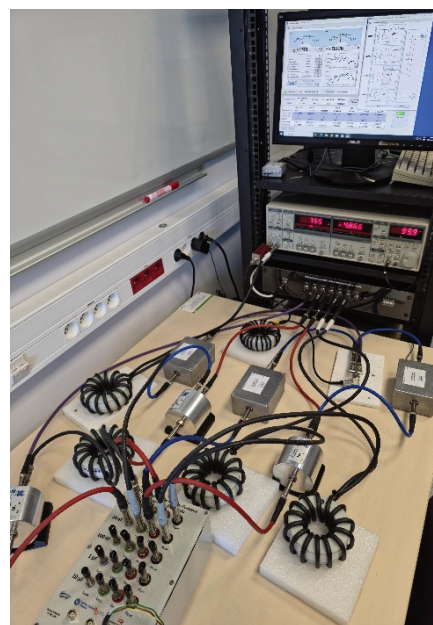
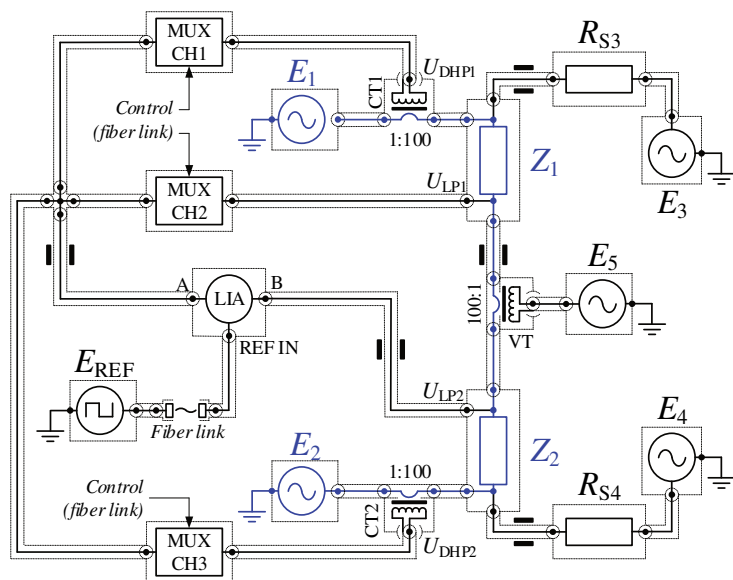
Ze względu na zasadę działania oraz sposób przetwarzania sygnałów cyfrowe mostki impedancji stosowane w porównaniach czteroportowych wzorców impedancji można podzielić na dwie główne

^a Trójstronne porównania nowych cyfrowych mostków impedancji przeznaczonych do komparacji wzorców, projekt finansowany ze środków MNiSW w ramach programu Polska Metrologia II.

grupy: mostki typu źródłowego (sourcing bridges) oraz mostki typu próbkującego (sampling bridges) [2]. Architektury te różnią się sposobem generacji i detekcji sygnałów oraz mechanizmami powstawania błędów, co bezpośrednio wpływa na ich właściwości metrologiczne.

2.1. Mostki typu źródłowego

Strukturę układową oraz fizyczną implementację opracowanego w Uniwersytecie Zielonogórskim źródłowego mostka impedancji (mostka z kalibrowanymi źródłami) przedstawiono na rys. 1. Kluczowym elementem mostka jest precyzyjne siedmiokanałowe cyfrowe źródło sygnałów sinusoidalnych DSS-2B, opracowane i rozwijane w IMEI-UZ w ramach dwóch projektów EUREMT oraz wdrożone w mostkach impedancji w narodowych instytutach metrologicznych Włoch (INRIM) i Irlandii (NSAI) [3]. W prezentowanym w artykule mostku wykorzystano pięć z siedmiu kanałów DSS-2B, oznaczonych jako E_1 – E_5 . Transformatory detekcyjne DT1 i DT2 o przekładni 1:100 wspomagają pomiar prądów płynących w głównych gałęziach mostka, w których występują źródła E_1 i E_2 . Transformator iniekcyjny IT (iniekcja niskopoziomowego sygnału napięciowego) wraz ze źródłem E_5 zapewniają spełnienie warunku $U_{LP1} = U_{LP2}$ w gałęzi Kelvina.



Rys. 1. Schemat mostka typu źródłowego rozwijanego w UZ i zdjęcie mostka UZ
Fig. 1. Schematic of the sourcing-based 4TP bridge developed at UZ and photograph of the UZ bridge

W warunkach pełnej równowagi, osiąganey automatycznie poprzez regulację amplitudy i fazy źródeł E_2 , E_3 , E_4 , E_5 , a której stan określany jest na podstawie wskazań synchronicznego woltomierza selektywnego (Lock-in Amplifier, LIA) dołączanego sekwencyjnie do odpowiednich punktów mostka, stosunek impedancji porównywanych wzorców - dzięki eliminacji wielkości pasożytniczych występujących w układzie - wyznacza się na podstawie zespolonego stosunku nastaw napięć wyjściowych bazowych kanałów źródła:

$$\Gamma_Z = \frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{E_1}{E_2}. \quad (1)$$

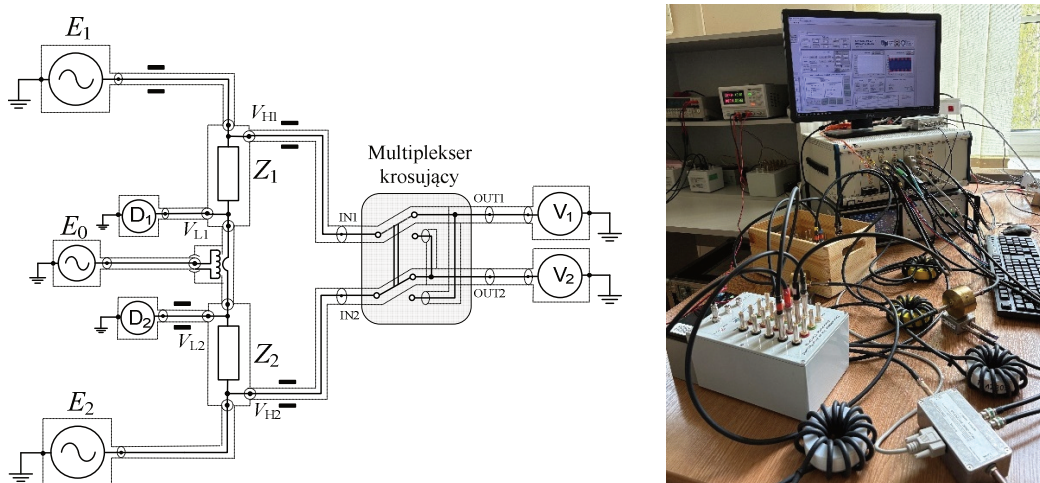
Woltomierz selektywny LIA jest dołączany do wybranych punktów układu za pomocą opracowanego w IMEI-UZ wysokoprecyzyjnego, trzykanałowego multipleksera MUX [4]. Sygnały sterujące kanałami multipleksera oraz sygnał referencyjny E_{REF} , ściśle synchronizowany częstotliwościowo z sygnałami E_1 – E_5 , są przesyłane za pomocą linków światłowodowych. Na schemacie czarnymi prostokątami oznaczono dławiki toroidalne, których zadaniem jest wyrównywanie prądów płynących w żyłach głównej i ekranie przewodów współosiowych łączących poszczególne elementy mostka.

2.2. Mostki typu próbkującego

W Głównym Urzędzie Miar (GUM, Warszawa) i w Politechnice Śląskiej (PŚ, Gliwice) rozwijane są czteroportowe mostki impedancji typu próbkującego. Zasilane są one ze stabilnego źródła dwufazowego opracowanego w PŚ [5]. Schemat mostka próbkującego i zdjęcie przedstawiające implementację w GUM obrazuje rys. 2. W stanie równowagi mostka ($V_{L1} = V_{L2} = 0$), otrzymanej w wyniku regulacji amplitudy i fazy źródła E_2 , stosunek impedancji porównywanych wzorców wyznacza się na podstawie zmierzonego zespolonego stosunku napięć:

$$\Gamma_P = \frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{V_{H1}}{V_{H2}}. \quad (2)$$

Zespolony stosunek napięć mierzony jest samplerami V_1 i V_2 przełączanymi między zaciskami wzorców za pomocą koncentrycznego multipleksera krosującego opracowanego w PŚ. Zastosowanie takiego przełącznika pozwala wykorzystać zalety próbkowania równoczesnego i sekwencyjnego, co wykazano w pracy [6]. Szczegóły odnośnie budowy i wstępne wyniki walidacji mostków rozwijanych w GUM i PŚ przedstawiono w pracach [7] i [8].



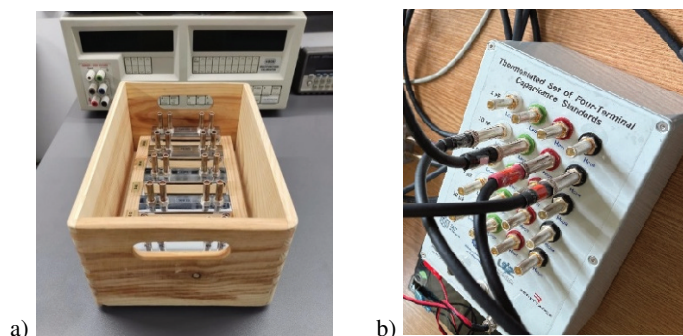
Rys. 2. Schemat mostka typu próbkującego rozwijanego w PŚ i w GUM i zdjęcie mostka GUM
Fig. 2. Schematic of the sampling-based 4TP bridges developed at SUT and GUM and photograph of the GUM bridge

3. WZORCE IMPEDANCJI

W ramach realizowanego obecnie przez trzy ośrodki: Uniwersytet Zielonogórski, Politechnikę Śląską i Główny Urząd Miar w Warszawie projektu badawczego w programie „Polska Metrologia II” opracowano dwa zestawy wzorców impedancji (rys. 3):

- zestaw pięciu oporników wzorcowych o wartościach od 10 Ω do 100 k Ω
- zestaw pięciu kondensatorów wzorcowych o wartościach od 1 nF do 10 μ F.

Do budowy wzorców rezystancji wykorzystano precyzyjne rezystory wykonane przez firmę Ohm-Labs z USA. Do budowy zestawu wzorców pojemności wykorzystano kondensatory SMD firmy Murata wyselekcjonowane z dużej grupy złożonej z kilkuset elementów. Wykonane badania stabilności temperaturowej wykazały współczynniki temperaturowe poniżej 1 ppm/ $^{\circ}$ C dla wzorców rezystancji i stabilność na poziomie 0,003 $^{\circ}$ C dla termostатовanego zestawu kondensatorów wzorcowych [9]. Biorąc pod uwagę współczynnik temperaturowe użytych kondensatorów wynoszące 30 ppm/ $^{\circ}$ C, maksymalna zmiana pojemności wynikająca ze stabilności termicznej nie przekracza 0,1 ppm. Oba zestawy (rezystorów i kondensatorów) zostały wywzorcowane w 2025 roku we włoskim krajowym instytucie metrologicznym INRIM.



Rys. 3. Zestaw czteroportowych wzorców rezystancji (a) i zestaw termostatowanych wzorców pojemności (b).
Fig. 3. Set of 4TP resistance standards (on the left) and set of thermostated 4TP capacitance standards (on the right).

4. PODSUMOWANIE

W pracy scharakteryzowano dwa typy elektronicznych cyfrowych mostków impedancji przeznaczonych do trójbustronnych porównań wzorców, prowadzonych przez Uniwersytet Zielonogórski, Politechnikę Śląską i Główny Urząd Miar w związku z realizacją projektu badawczego wymienionego w rozdziale pierwszym. Przy czym, w ramach projektu, w UZ został opracowany mostek typu źródłowego, natomiast mostek typu próbkującego jest zmodernizowaną wersją układu rozwijanego od kilku lat w PŚ przy współpracy z GUM. Scharakteryzowano również wzorce impedancji opracowane na potrzeby trójbustronnych porównań.

PODZIĘKOWANIA

Praca dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą Polska Metrologia, nr projektu PM-II/SP/0067/2024/02.

LITERATURA

1. Marzano M., Pimsut Y., Kruskopf M., Yin Y., Kraus M., D'Elia V., Callegaro L., Ortolano M., Bauer S., Behr R.: PTB–INRIM comparison of novel digital impedance bridges with graphene impedance quantum standards, *Metrologia* 59, 2022.
2. Ortolano M., Marzano M., D'Elia V., Tran N. T. M., Rybski R., Kaczmarek J., Kozioł M., Musioł K., Christensen A. E., Callegaro L., Kucera J., and Power O.: A comprehensive analysis of error sources in electronic fully digital impedance bridges, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–14, 2021, Art. no. 1500914.
3. Kaczmarek J., Ortolano M., Power O., Kučera J., Callegaro L., D'Elia V., Marzano M., Walsh R., Kozioł M., and Rybski R.: Virtual training laboratory for primary impedance metrology, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–12, 2023, Art. no. 1001312.
4. Kozioł M., Kaczmarek J., Rybski R., Kampik M., Musioł K., Jursza J., Koszarny M., Ziółek A., Zawadzki P.: Realizacja i badania modułowego współosiowego multipleksa analogowego, XVII Konferencja Podstawowe Problemy Metrologii (PPM'25), Gliwice, 28-30 maja 2025 r.
5. Kampik M., Musioł K.: Investigations of the high-performance source of digitally synthesized sinusoidal voltage for primary impedance metrology, *Measurement*, 2021, 168: 1–9.
6. Kampik M., Musioł K., Rybski R., Kaczmarek J., Kozioł M., Augustyn J., Ziółek A., Jursza J., Koszarny M.: An Improved Sampling-Based Impedance Bridge. *Energies*, 2025, 18(17):4733.
7. Kampik M., Musioł K., Ziółek A., Jursza J., Koszarny M.: Validation of 4TP impedance bridge developed at GUM, *Energies*, 2025;18.
8. Musioł K., Kampik M., Ziółek A., Jursza J.: Experiences with a new sampling-based four-terminal-pair digital impedance bridge, *Measurement*, 2022, 205:1–8.
9. Kampik M., Musioł K., Rybski R., Kaczmarek J., Kozioł M., Koszarny M., Ziółek A., Jursza J., Zawadzki P.: Temperature dependence of the new calibration infrastructure for impedance metrology, *Energies*, 18, 2025.