

Rola i znaczenie cyfrowych mostków impedancji we współczesnej metrologii

Krzysztof Musioł, Marian Kampik

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Adam Ziółek, Maciej Koszarny, Jolanta Jursza, Paweł Zawadzki

Główny Urząd Miar, Zakład Elektryczności i Promieniowania, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono obecne trendy w metrologii impedancyjnej najwyższych dokładności. Opisano rolę cyfrowych niekwantowych mostków impedancyjnych, które w ostatnim dziesięcioleciu są przedmiotem prac rozwojowych w wielu europejskich krajowych instytutach metrologicznych. Przedstawiono dwie struktury mostkowe czteroportowe (tzw. mostki generacyjne i próbkujące), które w ostatnich latach zostały wdrożone do stosowania w krajowych instytutach metrologicznych w Europie. Szczególną uwagę poświęcono cyfrowemu mostkowi impedancyjnemu, rozwijanemu obecnie w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie. Zaprezentowano jego schemat ideowy, implementację układową, a także przedstawiono postęp prac związanych z jego doskonaleniem i wdrożeniem go w niedalekiej przyszłości do krajowego systemu miar.

Słowa kluczowe: komparacja impedancji, wzorce impedancji, krajowe instytuty metrologiczne, mostek impedancyjny, cyfrowe źródła napięcia przemiennego

1. Wprowadzenie

Pomiary impedancji elektrycznej są wszechobecne w produkcji i badaniu urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz w projektowaniu, produkcji i testowaniu układów elektronicznych [1]. Przykładowo różne typy czujników: termometry oporowe, pojemnościowe czujniki przemieszczenia, czujniki zbliżeniowe (w tym ekrany dotykowe), barometry i higrometry, przekształcają nieelektryczną wielkość wejściową w zależną od niej wartość impedancji elektrycznej. Spektroskopia impedancyjna odgrywa bardzo ważną rolę w badaniach nieniszczących, realizowanych m.in. w różnego rodzaju analizach chemicznych i biologicznych, determinowaniu właściwości ciał stałych, cieczy i materiałów biologicznych oraz w pomiarach właściwości elektrycznych materiałów takich jak przenikalność, przepuszczalność i straty dielektryczne. Opiera się na dokładnym pomiarze impedancji układu lub próbki [2]. Ciągłe powstają nowe rodzaje sensorów o wyjściu impedancyjnym. Rozwój technologii wymaga też ciągłego doskonalenia wzorców impedancji odniesienia i układów wiążących wzorce użytkowe i aparaturę pomiarową stosowaną w wielu dziedzinach gospodarki z wzorcem jednostki miary impedancji. Poprawa dokładności pomiaru impedancji jest podstawą rozwoju nowych i ulepszonych pro-

duktów oraz zaawansowanych technologicznie procesów przemysłowych we wszystkich branżach.

Do połowy XX w. wielkością odniesienia dla składowych impedancji była indukcyjność własna. Jej jednostka w układzie SI, czyli henr, realizowano za pomocą wzorca indukcyjności własnej w postaci cewki o wartości indukcyjności obliczanej na podstawie jej wymiarów geometrycznych. Jednostki pojemności i rezystancji (odpowiednio om i farad) wyznaczano przez porównanie wzorca pojemności lub rezystancji z cewką wzorcową, z wykorzystaniem układów mostkowych. Sytuacja uległa radykalnej zmianie w latach 60. ubiegłego wieku wraz z opracowaniem kondensatora Thompsona-Lamparda, którego pojemność wyznaczano przez dokładny pomiar długości elektrod metodą interferometryczną [3]. Ten tzw. „liczalny” wzorec pojemności stosuje się do dziś w niektórych krajowych instytutach metrologicznych NMI (ang. *National Metrology Institutes*) w realizacji jednostki farada, z której to następnie wyznacza się jednostkę rezystancji.

Osiągnięcia fizyki kwantowej z końca ubiegłego wieku pozwoliły na opracowanie kwantowego wzorca rezystancji [4]. Stanowi on odniesienie dla wzorca pojemności i wzorca indukcyjności własnej. Takie podejście stosowane jest obecnie do realizacji jednostek impedancji w większości krajowych instytutów metrologicznych na świecie. Do przenoszenia wartości jednostki rezystancji na wzorce pojemności i indukcyjności wykorzystuje się układy mostkowe zwane komparatorami. Ich strukturę przedstawiono szczegółowo w [5, 6]. W niektórych NMI rozwijane są obecnie kwantowe źródła napięcia przemiennego. Stały się one podstawą nowej generacji cyfrowych komparatorów impedancji, w których wykorzystuje się dwukanałowe kwantowe źródła wzorcowego napięcia przemiennego typu PJVS (ang. *Programmable Josephson Voltage Standard*) oraz JAWS (ang. *Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer*) [7–11]. Wśród nich pojawiają się również systemy przystosowane do komparacji R-C z wyko-

Autor korespondujący:

Krzysztof Musioł, krzysztof.musiol@polsl.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 18.12.2023 r., przyjęty do druku 18.01.2024 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

rzystaniem wzorca rezystancji bazującego na kwantowym zjawisku Halla w grafenie [11]. Ze względu na znaczne koszty zakupu i utrzymania takich urządzeń kwantowych, tylko największe NMI zbudowały i rozwijają kwantowe mostki impedancyjne pozwalające osiągnąć niepewność komparacji na poziomie 10^{-7} .

Alternatywnym rozwiązaniem dla instytutów metrologicznych w mniejszych lub mniej zamożnych krajach jest budowa mostków niekwantowych. Jako wzorce stosunku napięć wykorzystują one cyfrowe źródła napięcia przemiennego [12]. W większości rozwijanych obecnie cyfrowych układów mostkowych do pomiaru zespolonego stosunku napięć wykorzystuje się układy próbkujące [13–16]. Zaletą mostków wyposażonych w cyfrowe źródła napięcia przemiennego jest możliwość pomiaru impedancji o składowych w całej płaszczyźnie zespolonej. W przeciwieństwie do mostków transformatorowych, liczba punktów pomiarowych jest nieograniczona. Ponadto możliwa jest też pełna automatyzacja procesu pomiarowego. Niepewności względne osiągane w pomiarach niekwantowymi cyfrowymi mostkami impedancyjnymi są na poziomie 10^{-5} – 10^{-6} .

2. Cyfrowe mostki impedancyjne w europejskich krajowych instytutach metrologicznych

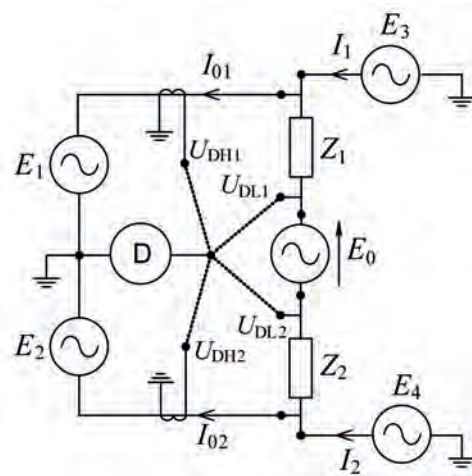
W zależności od sposobu wyznaczenia wzorcowego stosunku napięć, niekwantowe cyfrowe mostki impedancyjne można podzielić na dwie grupy:

- 1) tzw. mostki generacyjne (ang. *sourcing bridges*), w których stosunek napięć odwzorowuje się za pomocą odczytów z przetworników cyfrowo-analogowych [9, 17, 18],
- 2) tzw. mostki próbkujące (ang. *sampling bridges*), w których stosunek impedancji wyznacza się na podstawie stosunku napięć zmierzonych przez przetwornik analogowo-cyfrowy [13, 14].

Budowane i rozwijane obecnie w krajowych instytutach metrologicznych mostki przystosowane są do komparacji czteroportowych wzorców impedancji 4TP (ang. *four-terminal pair*) [6]. Wykorzystanie czterech ekranowanych przewodów, łączących mierzoną impedancję z układem mostka, pozwala uzyskać dużą dokładność, w tym również w pomiarach małych impedancji, oraz dobrą odporność na zakłócenia elektromagnetyczne.

Mostki generacyjne, rozwijane są m.in. we włoskim (INRiM) i irlandzkim (NSAI) krajowym instytucie metrologicznym. Mają one strukturę przedstawioną na rys. 1. W układach tych do komparacji współosiowych impedancji czteroportowych zastosowano pięć źródeł napięcia przemiennego: dwa źródła zasilające porównywane impedancje (oznaczone jako E_3 i E_4), dwa źródła pomiarowe (E_1 i E_2) pracujące w układzie kompensatora napięć, oraz źródło pomocnicze E_0 . Stan równowagi mostka osiągnięty jest zazwyczaj przez regulację amplitudy i fazy jednego ze źródeł pomiarowych (E_1 lub E_2) i źródła pomocniczego E_0 . Detektor przelączany jest między wymagane zaciski za pomocą sterowanego automatycznie multiplexera. Warunki definicyjne komparacji impedancji czteroportowych współosiowych wymagają zerowych wartości prądów I_{01} i I_{02} , wpływających lub wpływających z wysokonapięciowych zacisków wzorców impedancji, a także zerowych wartości napięć U_{DL1} , U_{DL2} na przekątnej komparatora impedancji. W przedstawionym na rys. 1 układzie spełnienie warunków definicyjnych możliwe jest dzięki:

- 1) zastosowaniu transformatorów prądowych umożliwiających pomiar prądów I_{01} i I_{02} w gałęzi kompensacyjnej;
- 2) zastosowaniu dodatkowego źródła E_0 , które kompensuje spadek napięcia na impedancji przewodu łączącego porównywane impedancje. Napięcie E_0 , dostarczane przez cyfrowe źródło napięcia, jest doprowadzane do układu za pomocą transformatora iniekcyjnego.



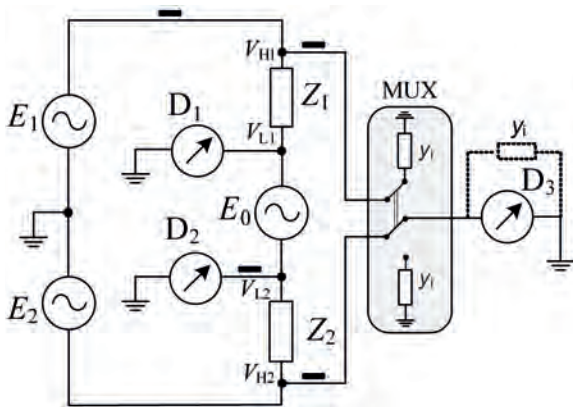
Rys. 1. Mostek impedancyjny typu generacyjnego
Fig. 1. Sourcing-type impedance bridge

Budowę i implementację mostka próbkującego, rozwijanego m.in. w szwajcarskim instytucie metrologicznym (METAS) i polskim Głównym Urzędzie Miar (GUM), przedstawiono w rozdziale 3.

Mostki generacyjne są bardziej odpowiednie do porównywania impedancji o dużych wartościach, zaś mostki próbkujące – do porównywania impedancji o małych wartościach [17]. Zarówno mostek generacyjny, jak i próbkujący wymagają zastosowania stabilnego, dwu- lub wielofazowego źródła napięcia przemiennego. Niestety komercyjne źródła napięcia przemiennego zazwyczaj nie spełniają wymagań metrologicznych, dotyczących m.in. stabilności ich napięcia wyjściowego [19–21]. Nie można więc ich stosować jako źródła w komparatorze impedancji o niepewności wskazanej w rozdziale 1. W [22] wykazano, że odchylenie standardowe stosunku napięć dla przetworników cyfrowo-analogowych, użytych do budowy komercyjnego modułu PXI-4461 firmy National Instruments (NI), wynosi $2,3 \mu\text{V/V}$. Ponadto stabilizacja temperatury modułów w obudowie PXI jest niewystarczająca. Dlatego też krajowe instytuty metrologiczne, we współpracy z uczelniami lub producentami sprzętu elektronicznego, podejmują próby konstruowania własnych rozwiązań niekomercyjnych [23–25]. W ostatnim dziesięcioleciu niekwantowe mostki impedancyjne wdrożyły do stosowania instytuty metrologiczne m.in. w następujących krajach: Szwajcarii (mostek próbkujący METAS) [13, 15], Czechach (mostek próbkujący i generacyjny CMI) [13, 15–16], Danii (mostek próbkujący Trescal) [26], Estonii (mostek próbkujący Metroser), Włoszech (mostek generacyjny INRiM) [16] i w Irlandii (mostek generacyjny NSAI) [17]. Natomiast instytuty metrologiczne w USA (NIST) i w Niemczech (PTB) koncentrują się na rozwoju kwantowych mostków impedancyjnych [8, 9]. Najnowsze rozwiązania prezentowane przez naukowców z NIST i PTB dotyczą mostka zasilanego kwantowym źródłem Josephsona, w którym jako wzorzec odniesienia zastosowano kwantowy wzorzec Halla wykonany z użyciem grafenu [11].

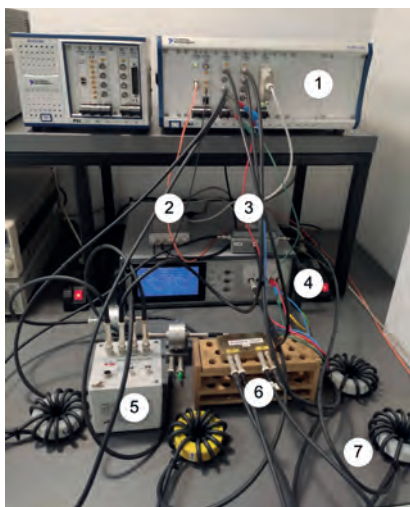
3. Cyfrowy mostek impedancyjny w Głównym Urzędzie Miar

Obecnie w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie wdrażany i rozwijany jest układ cyfrowego mostka do komparacji impedancji czteroportowych. Wykorzystuje się w nim precyzyjne dwufazowe źródło napięcia przemiennego. Prace nad rozbudową układu mostka cyfrowego w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości Głównego Urzędu Miar w Warszawie prowadzone są we współpracy z Politechniką



Rys. 2. Schemat mostka RLC opartego na próbkowaniu napięć przemiennych

Fig. 2. Schematic of an RLC bridge based on sampling AC voltages. For clarity, the screen system is omitted in this drawing, the black rectangles mark the coaxial chokes acting as current equalizers



Rys. 3. Implementacja mostka GUM: 1 – system próbkujący napięcia NI PXI, 2 – konwerter opto/TTL, 3 – multiplexer, 4 – cyfrowe źródło napięcia przemiennego, 5 – termostatyzowany wzorzec pojemności, 6 – wzorzec rezystancji Vishay, 7 – equalizer prądowy (choke)

Fig. 3. Implementation of the GUM bridge: 1 – NI PXI sampling system, 2 – opto/TTL converter, 3 – multiplexer, 4 – digital AC voltage source, 5 – thermostated capacitance standard, 6 – Vishay resistance standard, 7 – current equalizer (choke)

Śląską w ramach projektu finansowanego z programu MEiN „Polska Metrologia” w latach 2022–2024. Najważniejszą zaletą i nowością systemu, w porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami [14, 16], jest zastosowanie dwukanałowego precyzyjnego syntetyzowanego cyfrowo źródła napięcia przemiennego [24]. Opracował je zespół badaczy z Politechniki Śląskiej w ramach międzynarodowego projektu EMPIR SIB53 AIM QuTE: *Automated impedance metrology extending the quantum toolbox for electricity* [23, 25].

Uproszczony schemat ideowy mostka przedstawiono na rys. 2, a jego implementację na rys. 3. Dla przejrzystości schematu ideowego pominięto w nim system ekranów. Zaczernionymi prostokątami oznaczono dławiki współosiowe, pełniące rolę equalizerów prądowych (chokes).

Przestawiony komparator (rys. 2) bazuje na koherentnym próbkowaniu sekwencyjnym napięć V_{HI} i V_{HI2} na porównywanych impedancjach Z_1 i Z_2 . Podobnie jak w przypadku mostka typu generacyjnego stan równowagi układu osiąga się przez regulację amplitudy i fazy jednego ze źródeł zasilających (E_1 lub E_2) i źródła pomocniczego E_0 . W stanie równowagi układu stosunek impedancji wyznacza się z zależności:

$$\Gamma = \frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{V_{HI}}{V_{HI2}}. \quad (1)$$

Układ jest w pełni zautomatyzowany, a za proces równoważenia i wizualizacji wyników odpowiada oprogramowanie napisane w środowisku LabVIEW. W procesie równoważenia mostka wykorzystano metodę siecznych opisaną w pracy [27]. Szczegółowe informacje o warstwie sprzętowej PXI, wykorzystanej w systemie i opis procesu pomiaru zespolonego stosunku napięć, zamieszczono w [28].

Walidację cyfrowego mostka impedancyjnego wykonano w dwojaki sposób:

- 1) tzw. metodą trójkątów metrologicznych [28, 29],
- 2) przy wykorzystaniu wzorców skalibrowanych.

Do walidacji układu wykorzystano czteroportowe wzorce impedancji, zaprojektowane i wykonane przez zespół z Głównego Urzędu Miar i Politechniki Śląskiej. Szczegóły konstrukcji czteroportowych wzorców pojemności i rezystancji są podane w pracach [30, 31]. Pomiar walidacyjny mostka cyfrowego wykonano w Głównym Urzędzie Miar, a także w szwajcarskim instytucie metrologicznym METAS i włoskim instytucie metrologicznym INRIM. Kalibracje w INRIM wykonano w ramach międzynarodowego projektu badawczego *A versatile electrical impedance calibration laboratory based on digital impedance bridges* [32]. Wstępne wyniki walidacji wykonanej w GUM przedstawiono w pracy [28]. Otrzymane wyniki walidacji pozwalają wyciągnąć wniosek, że niepewność mostka cyfrowego przy komparacji impedancji z zakresu od 100 Ω do 100 k Ω jest na poziomie 10^{-5} – 10^{-6} .

Należy podkreślić, iż wyrażony równaniem (1) wynik komparacji impedancji komparatorem ilorazowym jest wrażliwy na błędy nieliniowości układu próbkującego D_3 , nazywanego samplerem. Ze względu na błędy pomiaru samplera w rzeczywistym układzie pomiarowym wartości napięć V_{HI} i V_{HI2} różnią się od wartości odczytanych. Można wykazać, że przy założeniu braku rewersji wzorców dla komparatora próbkującego względny błąd stosunku napięć, wynikający z nieliniowości samplera, wyraża się zależnością [17]:

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} \approx g(V_2^{\text{read}}) - g(V_1^{\text{read}}), \quad (2)$$

gdzie: g – oznacza wzmocnienie samplera, a V_i^{read} – wartość napięcia zmierzona przez sampler.

Występujące w zależności (2) współczynniki mogą być wyznaczone następującymi metodami:

- 1) z wykorzystaniem wzorcowego stosunku napięć (np. odtwarzanym przez indukcyjny dzielnik napięcia [33]) lub wzorcowego stosunku impedancji;
- 2) przy wykorzystaniu metody permutowanych pojemności [34] lub metody skalowania pojemności (ang. *build-up method*) [35].

Metodę z wzorcowym stosunkiem impedancji autorzy pracy wykorzystali w badaniach sześciokanałowego źródła napięcia DSS-INRIM, opracowanego w Uniwersytecie Zielonogórskim (UZG) i użytego do zasilania komparatora typu generacyjnego, zaimplementowanego we włoskim NMI. Badania wykonano podczas stażu naukowego jednego z autorów w instytucie INRiM w Turynie wykorzystując wzorce pojemności o wartościach 1 nF, 2 nF i 5 nF. Wzorcowe stosunki pojemności 1:1, 1:2 i 1:5 wyznaczono na podstawie pomiarów pojemności precyzyjnym mostkiem Andeen-Hagerling AH2700 o błędzie nieliniowości na poziomie $1 \cdot 10^{-6}$. Wyniki pomiarów wykonanych przy częstotliwości 1 kHz i 1,6 kHz przedstawiono w pracy [17].

Otrzymane wyniki świadczą o potrzebie korekcji błędów nieliniowości w przypadku zamiaru wykorzystywania komparatora do porównania impedancji o znacznie różniących się modułach (stosunki powyżej 2:1) z niepewnością na poziomie 10^{-6} .

Błędy nieliniowości digitizerów użytych w komparatorze próbkującym rozwijanym obecnie w GUM-pierwotnie wyznaczono metodą wykorzystującą wzorcowy 7-dekadowy indukcyjny dzielnik napięcia ESI Dekatran DT72A. Szczegółowe wyniki badań dla stosunków napięć z przedziału 0,2–1 można znaleźć w pracy [36]. Ponieważ według specyfikacji producenta, błędy nastaw stosunku napięć dla użytego dzielnika napięcia przekraczają $2 \mu\text{V}/\text{V}$, to wykonane tą metodą badania mają jedynie charakter informacyjny i nie mogą być wykorzystane w korekcji błędów samplerów. Celowe było zatem zaprojektowanie i skonstruowanie układu, który zapewniłby możliwość wyznaczenia błędów nieliniowości z niepewnością na poziomie co najmniej 10^{-7} . Zaproponowano więc układ z permutacją kondensatorów [37].

Prace prowadzone obecnie w ramach projektu „Polska Metrologia” koncentrują się na badaniach nieliniowości samplerów PXI. W mostku cyfrowym wykorzystuje się je do komparacji impedancji przy zastosowaniu układu z permutacją pojemności. Pozwoli to na skorygowanie błędu nieliniowości samplera, gdyż od niego w głównej mierze zależy dokładność komparacji impedancji o stosunku modułów różnym od jedności [17].

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono aktualne trendy we współczesnej metrologii impedancyjnej. O dużym znaczeniu pomiaru impedancji we współczesnej metrologii światowej świadczy fakt, iż w ostatnich kilku latach europejska organizacja metrologiczna Euramet przyznała finansowanie trzem dużym projektom międzynarodowym. Dotyczą one rozwoju cyfrowych układów do komparacji impedancji. W dwóch z tych projektów, jednym z partnerów był Główny Urząd Miar, a także zespoły z Politechniki Śląskiej i Uniwersytetu Zielonogórskiego.

W artykule szczególny nacisk położono na rolę i znaczenie mostków opartych na niekwantowych cyfrowych źródłach napięcia przemiennego. Mostki te służą do komparacji czteroportowych wzorców impedancji. Takie rozwiązanie jest wdrażane obecnie w Głównym Urzędzie Miar. Stanowisko z cyfrowym komparatorem impedancji w GUM jest rozwijane we współpracy z Politechniką Śląską w ramach projektu finansowanego z programu rządowego „Polska Metrologia” na lata 2022–2024. Prace koncentrują się na rozszerzeniu zakresu częstotliwościowego, zmniejszeniu niepewności pomiaru i rozbudowie układu w kierunku możliwości komparacji impedancji o stosunku modułów 10:1.

Podziękowania

Praca została sfinansowana z projektu badawczego nr PM/SP/0029/2021, realizowanego w ramach programu MEiN pt. „Polska Metrologia”.

Bibliografia

- Hernández-Ramírez J., Segundo-Ramírez J., Visairo N., Nuñez C., *Application of the Impedance-Based Method in Power Electronics: A Step-by-Step Review*, 2021 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, DOI: 10.1109/ROPEC53248.2021.9668073.
- Kanoun O. et al., *Impedance Spectroscopy: Applications, Advances and Future Trends*, „IEEE Instrumentation & Measurement Magazine”, Vol. 25, No. 3, 2022, 11–21, DOI: 10.1109/MIM.2022.9759355.
- Thompson A.M., Lampard D.G., *A new theorem in electrostatics and its application to calculable standard of capacitance*, „Nature”, Vol. 177, No. 888, 1956, DOI: 10.1038/177888a0.
- Taylor B.N., Witt T.J., *New international electric reference standards based on the Josephson and quantum Hall effects*, „Metrologia”, Vol. 26, No. 1, 1989, 47–62, DOI: 10.1088/0026-1394/26/1/004.
- Overney F., Jeanneret B., *Impedance bridges: from Wheatstone to Josephson*, „Metrologia”, Vol. 55, No. 5, 2018, S119–S134, DOI: 10.1088/1681-7575/aac6f6c.
- Callegaro L., *Electrical Impedance: Principles, Measurement, and Application*. CRC Press, 2013.
- Lee J., Schurr J., Nissila J., Palafox L., Behr R., Kibble B.P., *Programmable Josephson Arrays for Impedance Measurements*, “IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 60, No. 7, 2011, 2596–2601, DOI: 10.1109/TIM.2011.2117311.
- Overney F., Flowers-Jacobs N.E., Jeanneret B., Rufenacht A., Fox A.E., Dresselhaus P.D., Benz S.P., *Dual Josephson impedance bridge: towards a universal bridge for impedance metrology*, „Metrologia”, Vol. 57, No. 6, 2020, DOI: 10.1088/1681-7575/ab948d.
- Overney F., Flowers-Jacobs N.E., Jeanneret B., Rufenacht A., Fox A.E., Underwood J.M., Koffman A.D., Benz S.P., *Josephson-based full digital bridge for high-accuracy impedance comparisons*, „Metrologia”, Vol. 53, No. 4, 2016, 1045–1053, DOI: 10.1088/0026-1394/53/4/1045.
- Bauer S., Behr R., Hagen T., Kieler O., Lee J., Palafox L., Schurr J., *A novel two-terminal-pair pulse-driven Josephson impedance bridge linking a 10 nF capacitance standard to the quantized Hall resistance*, „Metrologia”, Vol. 54, No. 2, 2017, 152–160, DOI: 10.1088/1681-7575/aa5ba8.
- Bauer S., Behr R., Elmquist R.E., Götz M., Herick J., Kieler O., Kruskopf M., Lee J., Palafox L., Pimsut Y., *A four-terminal-pair Josephson impedance bridge combined with a graphene-quantized Hall resistance*, „Measurement Science and Technology”, Vol. 32, 2021, DOI: 10.1088/1361-6501/abcf33.
- Kampik M., *High Performance Digitally Synthesized Source for Very Low-Frequency AC Voltage Calibrator*, IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007, 1–6, DOI: 10.1109/IMTC.2007.379021.
- Mašláň S., Šíra M., Skalická T., Bergsten T., *Four-Terminal Pair Digital Sampling Impedance Bridge up to 1 MHz*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 68, No. 6, 2019, 1860–1869, DOI: 10.1109/TIM.2019.2908649.
- Overney F., Jeanneret B., *RLC Bridge Based on an Automated Synchronous Sampling System*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 60, No. 7, 2011, 2393–2398, DOI: 10.1109/TIM.2010.2100650.
- Kučera J., Kováč J., *A reconfigurable four terminal-pair digitally assisted and fully digital impedance ratio bridge*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 67, No. 5, 2018, 1199–1206, DOI: 10.1109/TIM.2018.2790538.
- Ortolano M., Palafox L., Kučera J., Callegaro L., D’Elia V., Marzano M., Overney F., Gülmez G., *An international comparison of phase angle standards between the novel impedance bridges of CMI, INRIM and METAS*, „Metrologia”, Vol. 55, No. 4, 2018, 499–512, DOI: 10.1088/1681-7575/aabf24.
- Ortolano M. et al., *A Comprehensive Analysis of Error Sources in Electronic Fully Digital Impedance Bridges*, “IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 70, 2021, DOI: 10.1109/TIM.2020.3034115.

18. Callegaro L., D'Elia V., Kampik M., Kim D.B., Ortolano M., Pourdanesh F., *Experiences with a two-terminal-pair digital impedance bridge*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 64, No. 6, 2015, 1460–1465, DOI: 10.1109/TIM.2015.2401192.
19. Koziol M., Kaczmarek J., Rybski R., *Characterization of PXI-based generators for impedance measurement setups*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 68, No. 6, 2019, 1806–1813, DOI: 10.1109/TIM.2019.2893715.
20. Overney F., A. Rufenacht, Braun J., Jeanneret B, Wright P.S., *Characterization of Metrological Grade Analog-to-Digital Converters Using a Programmable Josephson Voltage Standard*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 60, No. 7, 2011, 2172–2177, DOI: 10.1109/TIM.2011.2113950.
21. Kučera J, Kováč J, Palafox L., Behr R., Vojáčková L., *Characterization of a precision modular sinewave generator*, „Measurement Science and Technology”, Vol. 31, No. 6, 2020, DOI: 10.1088/1361-6501/ab6f2e.
22. Rybski R., Kaczmarek J., Koziol M., *A High-Resolution PXI Digitizer for a Low-Value-Resistor Calibration System*, „IEEE Transactions on Instrumentation of Measurement”, Vol. 62, No. 6, 2013, 1783–1788, DOI: 10.1109/TIM.2012.2225958.
23. SIB53 AIM QuTE Final Publishable JRP Report, June 2017.
24. Kampik M., Musioł K., *Investigations of the high-performance source of digitally synthesized sinusoidal voltage for primary impedance metrology*, „Measurement”, Vol. 168, 2021, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108308.
25. Palafox L., Raso F., Kučera J., Overney F., Callegaro L., Gournay P., Ziółek A., Nissilä J., Eklund G., Lippert T., Gülmez Y., Fleischmann P., Kampik M., Rybski R., *AIM QuTE: Automated Impedance Metrology extending the Quantum Toolbox for Electricity*, 16th International Congress of Metrology, Paris, France, October 7-10, 2013, DOI: 10.1051/metrology/201311001.
26. Christensen A., *A versatile electrical impedance calibration laboratory based on a digital impedance bridge*, 19th International Congress of Metrology, 2019, DOI: 10.1051/metrology/201911002.
27. Callegaro L., *On strategies for automatic bridge balancing*, „IEEE Transactions on Instrumentation of Measurement”, Vol. 54, No. 2, 2005, 529–532, DOI: 10.1109/TIM.2004.843126.
28. Musioł K., Kampik M., Koszarny M., *A new sampling-based four-terminal-pair digital impedance bridge*, „Measurement: Sensors”, Vol. 18, 2021, DOI: 10.1016/j.measen.2021.100307.
29. Musioł K., Kampik M., *Metrological triangles in impedance comparisons*, „Measurement”, Vol. 148, 2019, DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106908.
30. Musioł K., Koszarny M., Kampik M., Rzodkiewicz W., Zawadzki P., *Czteroportowe kondensatory wzorcowe o pojemności z przedziału od 1 nF do 10 nF*, „Przegląd Elektrotechniczny”, Vol. 98, Nr 12, 2022, 52–55, DOI: 10.15199/48.2022.12.13.
31. Musioł K., Koszarny M., Kampik M., Kubiczek K., Ziółek A., Jursza J., *A new impedance metrology infrastructure at GUM*, 25th IMEKO TC-4 International Symposium on Measurement of Electrical Quantities, September 12-14, 2022, Brescia, Italy, 243–247.
32. *A versatile electrical impedance calibration laboratory based on digital impedance bridges*, Final Publishable Report of the EMPIR project 17RPT04 VersICaL, <https://www.euramet.org/>.
33. Callegaro L., D'Elia V., Manta F., *A setup for linearity measurement of precision AC voltmeters in the audio frequency range*, 16th IMEKO TC4 Symposium, Florence, 2008.
34. Cutkosky R.D., Shields J.Q., *The precision measurement of transformer ratios*, „IRE Transactions on Instrumentation”, Vol. 9, No. 2, 1960, 243–250, DOI: 10.1109/IRE-I.1960.5006925.
35. Tran N.T.M., D'Elia V., Callegaro L., Ortolano M., *A Capacitance Build-Up Method to Determine LCR Meter Errors and Capacitance Transfer*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 69, No. 8, 2020, 5727–5735, DOI: 10.1109/TIM.2019.2960620.
36. Musioł K., *Experimental Study of Digitizers Used in High-Precision Impedance Measurements*, „Energies”, Vol. 15, No. 11, 2022, DOI: 10.3390/en15114051.
37. Hsu J.C., Gong J., Huang C.F., *An Automated Permuting Capacitor Device for Calibration of IVDs*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. 63, No. 9, 2014, 2271–2278, DOI: 10.1109/TIM.2014.2308035.

The Role and Importance of Digital Impedance Bridges in Contemporary Metrology

Abstract: The article presents current trends in impedance metrology of the highest accuracy. Attention was paid to digital non-quantum impedance bridges, which have been developed in many European National Metrology Institutes over the last decade. Particular attention in the article was devoted to the digital impedance bridge currently being developed at the Central Office of Measures in Warsaw. The conceptual diagram, system implementation and the progress of work related to the development of this bridge and its implementation in the near future into the national measurement system are presented as well.

Keywords: impedance comparison, impedance standards, national metrology institutes, impedance bridge, digital AC voltage sources

dr inż. Krzysztof Musiołkrzysztof.musiol@polsl.pl
ORCID: 0000-0001-5532-7463

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej (2002). Od 2007 r. adiunkt w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Główne obszary zainteresowań to wzorcowe układy pomiarowe służące do pomiaru impedancji i napięcia przemiennego. Kierownik trzech projektów badawczych z obszaru metrologii najwyższych dokładności, autor 97 publikacji naukowych, w tym ponad 80 dotyczących elektrycznych pomiarów dokładnych. Prowadzi aktywną współpracę z krajowymi instytutami metrologicznymi w Europie, takimi jak METAS, INRiM, CMI i GUM.

**prof. dr hab. inż. Marian Kampik**marian.kampik@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-4928-3684

Absolwent Politechniki Śląskiej (1988). Dziekan Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej i kierownik Katedry Metrologii, Elektroniki i Automatyki na tym wydziale. Autor ponad 260 prac naukowych, dotyczących dokładnych pomiarów oraz wzorców wielkości elektrycznych. Laureat Nagrody Siemens (2003) i Złotego Medalu IEEE (2020). Dwukrotnie stypendysta DAAD. Odbił kilkanaście staży w zagranicznych instytutach metrologicznych. Kierownik projektów badawczych, finansowanych m.in. przez KBN, MEIN, NCN i NCBiR. W 2013 r. otrzymał indywidualny Research Excellence Grant, finansowany przez EMRP.

**mgr inż. Paweł Zawadzki**pawel.zawadzki@gum.gov.pl
ORCID: 0000-0002-1302-1623

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Od 1998 r. pracuje w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie. Obecnie pełni funkcję Dyrektora Zakładu Elektryczności i Promieniowania. Główne obszary zainteresowań to wzorcowanie i badanie wzorcowych przyrządów pomiarowych do pomiarów podstawowych wielkości elektrycznych, w tym termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia i prądu elektrycznego przemiennego (AC/DC). Jest współautorem kilkunastu publikacji naukowych z ww. dziedzin. Koordynuje współpracę w dziedzinie elektryczności i magnetyzmu z krajowymi uczelniami technicznymi oraz instytutami naukowymi. Jest przedstawicielem GUM w Europejskim Stowarzyszeniu Krajowych Instytutów Metrologicznych EURAMET. Prowadzi współpracę z takimi instytutami jak PTB (Niemcy), CMI (Czechy), INRiM (Włochy) i inne.

**mgr inż. Adam Ziółek**adam.ziolek@gum.gov.pl
ORCID: 0000-0001-6068-1934

Absolwent Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej (2009). Od 2009 r. pracownik Głównego Urzędu Miar. Obecnie na stanowisku głównego metrologa w Zakładzie Elektryczności i Promieniowania GUM. Specjalista w dziedzinie pomiarów RLC, opiekun państwowego wzorca pomiarowego jednostki miary pojemności elektrycznej, uczestnik projektów europejskich w ramach programu EMRP AIMQuTE (2013–2016), programu EMPIR VerSiCaL (2018–2021), koordynator porównań międzylaboratoryjnych w dziedzinie pojemności elektrycznej, współautor publikacji z dziedziny impedancji.

**Maciej Koszarny**maciej.koszarny@gum.gov.pl
ORCID: 0000-0003-1296-5769

Absolwent ALMAMER Szkoły Wyższej w Warszawie. Starszy metrolog w Głównym Urzędzie Miar w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości w Zakładzie Elektryczności i Promieniowania. Jest współautorem artykułów z dziedziny metrologii. Uczestnik projektów badawczych europejskich oraz krajowych z obszaru metrologii. Zaangażowany w rozwój cyfrowych układów pomiarowych w dziedzinie impedancji. Obecne zainteresowania badawcze obejmują budowę wzorców pojemności, wzorców rezystancji AC oraz termostatów. Zaangażowany w budowę układów poprawiających parametry zasilania w instalacji sieci niskiego napięcia. Prowadzi aktywną współpracę z krajowymi instytucjami metrologicznymi takimi jak Politechnika Śląska, Uniwersytet Zielonogórski, WAT, Instytut Łączności i Okręgowe Urzędy Miar.

**mgr inż. Jolanta Jursza**jolanta.jursza@gum.gov.pl
ORCID: 0000-0001-6236-4940

Absolwentka Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1992). Praca w Głównym Urzędzie Miar od 1998 r., od metrologa do głównego metrologa (obecnie) w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości w Zakładzie Elektryczności i Promieniowania. Specjalista w dziedzinie pomiarów R, L, C. Opiekun państwowego wzorca jednostki miary indukcyjności. Uczestnik projektów europejskich w ramach programu EMRP – AIMQuTE (2013–16), programu EMPIR – VerSiCaL (2018–21). Koordynator porównań międzylaboratoryjnych w dziedzinach indukcyjności oraz rezystancji AC. Współautor publikacji z dziedziny impedancji.

