

Czteroportowe kondensatory wzorcowe o pojemności z przedziału od 1 nF do 10 μF

W ramach współpracy Głównego Urzędu Miar (GUM) z Katedrą Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) Politechniki Śląskiej w Gliwicach, której celem jest rozbudowa infrastruktury pomiarowej w dziedzinie pomiarów impedancji, skonstruowano czteroportowe termostatyzowane zestawy wzorców pojemności elektrycznej o wartości z przedziału od 1 nF do 10 μF. Odtwarzana przez wzorcowy kondensator z dielektrykiem C0G/NP0 wartość pojemności elektrycznej charakteryzuje się dużą dokładnością, stabilnością i współczynnikiem strat dielektrycznych mniejszym od 6×10^{-5} przy częstotliwości 1 kHz. W artykule przedstawiono konstrukcję wzorców pojemności oraz zaprezentowano wyniki badań ich stabilności termicznej.

Abstract. Within the cooperation of the Central Office of Measures (GUM) in Poland and the Department of Measurement Science, Electronics and Control (KMEiA) of the Silesian University of Technology in Gliwice, the aim of which is to expand the measuring infrastructure in the field of impedance measurements, four-terminal-pair thermostated sets of capacitance standards with values ranging from 1 nF to 10 μF were constructed. The values of the capacitance reproduced by the developed standards with a dielectric C0G / NP0 is characterized by high accuracy and stability. Moreover, the dielectric loss factor of these standards is below 6×10^{-5} at 1 kHz. The paper presents the construction of capacitance standards and results of testing of their thermal stability. (**Four-terminal-pair standard capacitors with capacitance in the range from 1 nF to 10 μF**).

Słowa kluczowe: komparacja impedancji, termostat, wzorzec pojemności, wzorzec rezystancji.

Keywords: impedance comparison, thermostat, capacitance standard, resistance standard.

Wprowadzenie

Pomiary impedancji elektrycznej są wszechobecne w procesie projektowania, produkcji i testowania urządzeń elektrycznych i układów elektronicznych [1-3]. Różne typy czujników: termometry oporowe, pojemnościowe czujniki przemieszczenia, czujniki zbliżeniowe (w tym ekrany dotykowe), barometry i higrometry, przekształcają nieelektryczną wielkość wejściową w impedancję elektryczną. Spektroskopia impedancyjna, odgrywająca bardzo ważną rolę w badaniach nieniszczących w szerokim zakresie analiz również oparta jest na dokładnym pomiarze impedancji układu lub próbki [4-6]. Zapewnienie spójności w pomiarach impedancji wymaga stosowania odpowiednich wzorców i wzorcowych układów pomiarowych, umożliwiających odniesienie wartości mierzony impedancji do impedancji wzorca o dużej dokładności. Największą możliwą dokładność w szerokim zakresie wartości impedancji porównywanych przy częstotliwościach akustycznych osiąga się w tzw. układzie czteroportowym o czterech wyprowadzeniach ekranowanych (ang. *Four-Terminal Pair*, 4TP) [7-9]. W ostatnich latach obserwowany jest na świecie dynamiczny rozwój cyfrowych układów przystosowanych do komparacji czteroportowych [10-23]. Wśród nich są również te oparte o kwantowe źródła napięcia przemiennego [19-21] i takie, które są przystosowane do komparacji R-C z wykorzystaniem wzorca rezystancji opartego o kwantowy efekt Halla [22, 23].

Niestety komercyjnie dostępne wzorce impedancji produkowane przez takie firmy jak QuadTech (wcześniej General Radio) czy Tinsley nie są zazwyczaj wyposażone w złącza koncentryczne i tym samym nie odpowiadają definicji pomiaru czteroportowego. To skłania krajowe instytuty metrologiczne do konstruowania własnych lub modyfikowania komercyjnych wzorców i wyposażania ich w cztery współosiowe gniazda ekranowane, najczęściej typu BPO MUSA [24-28].

Najnowsze badania w obszarze konstrukcji cyfrowych źródeł napięcia przemiennego prowadzone m.in. w ramach projektów międzynarodowych SIB53 AIMQuTE [29] i

17RPT04 VersiCaL [30] wykazały możliwość poprawy dokładności odtwarzania jednostek miary składowych impedancji przy relatywnie niskich nakładach finansowych. Poprawa dokładności na najwyższym poziomie metrologicznym, osiągnięta przez wdrożenie uniwersalnego czteroportowego mostka impedancyjnego przyczynia się także do poprawy dokładności wzorcowań elementów i układów wykorzystywanych w przemyśle i centrach badawczych. Ze względu na wdrażanie w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie układu komparacji impedancji czteroportowych, wykorzystującego precyzyjne dwukanałowe źródło napięcia przemiennego [31], naturalnym staje się konieczność dostosowania infrastruktury wzorców impedancji do komparacji czteroportowych. W ramach niniejszej pracy opracowano, wykonano i przebadano zestawy termostatyzowanych wzorców pojemności z zakresu od 1 nF do 10 μF, przystosowane do komparacji czteroportowych w paśmie częstotliwości akustycznych.

Konstrukcja wzorców

W kondensatorach wzorcowych o względnie dużej pojemności rolę dielektryka pełniły dotychczas szkło amorficzne lub mika. Dlatego też kondensatory wzorcowe z dielektrykiem stałym charakteryzują się dużym współczynnikiem temperaturowym, sięgającym $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ i stabilnością długoterminową roczną $\pm 0,05\%$. Konieczne jest wówczas korzystanie z zewnętrznych termostatów dedykowanych do komparacji wzorców [32]. Opracowanie i wprowadzenie na rynek w ostatnich latach wielowarstwowych kondensatorów ceramicznych (ang. *Multilayer Ceramic Capacitor*, MLCC) z dielektrykiem NP0 (ang. *Negative/Positive Zero temperature coefficient*) o nieporównywalnie lepszych parametrach od kondensatorów z dielektrykiem mikowym, stwarza nowe możliwości budowy bardziej stabilnych czasowo i temperaturowo wzorców pojemności. Wielowarstwowy kondensator ceramiczny to monolityczny blok ceramiczny zawierający dwa zestawy przesuniętych, przeplatanych płaskich elektrod, które

rociągną się na dwie przeciwległe powierzchnie ceramicznego dielektryka. Dielektrykami kondensatorów MLCC są spiekane zawiesziny ultra-drobnego proszku wykonanych z materiału NP0. Pierwotnie w kondensatorach z dielektrykiem NP0, stosowano takie materiały dielektryczne jak tytanian baru (BaTiO_3), tytanian wapnia (CaTiO_3), tytanian strontu (SrTiO_3) i tytanian magnezu (Mg_2TiO_4). Współcześnie w skład dielektryków NP0 wchodzi dwutlenek tytanu (TiO_2) lub tytanian wapnia (CaTiO_3) - tlenki o dodatnich i ujemnych współczynnikach temperaturowych oraz duża ilość tlenków metali ziem rzadkich takich jak neodym (Nd), samar (Sm), cyrkon (Zr) czy niob (Nb).

Autorzy opracowali i zbudowali wzorce pojemności wykorzystujące kondensatory klasy 1 z dielektrykiem NP0 firmy Murata [33] o współczynniku temperaturowym $(0 \pm 30) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ i współczynniku strat dielektrycznych mniejszym od 6×10^{-5} przy częstotliwości 1 kHz. Tolerancja pojemności użytych kondensatorów NP0, zgodnie ze specyfikacją producenta, jest mniejsza niż $\pm 0,05\%$ w porównaniu do $\pm 2\%$ dla kondensatorów foliowych. Stabilność długookresowa wynosi $\pm 0,1\%$ i jest pięciokrotnie lepsza niż kondensatorów z innymi dotychczas wykorzystywanymi dielektrykami takimi jak: Y5V, X5R, X7R. Zbudowano jeden kondensator o wartości nominalnej 10 nF i oznaczeniu KC0G-10nF, a także dwa zestawy oznaczone odpowiednio: KC0G-1XF L52-1/20 i KC0G-1XF L52-2/21 złożone z pięciu kondensatorów o wartościach pojemności: 1 nF, 10 nF, 100 nF, 1 μF i 10 μF (rys. 1). Zakres pojemności od 1 nF do 10 μF pokrywa (przy częstotliwości równej 1 kHz) szeroki zakres impedancji od pojedynczych Ω do setek k Ω . Wartość 10 nF jest jedną z najczęściej odtwarzanych wartości w krajowych instytutach metrologicznych. Wynika to z faktu, że dla 10 nF i typowej częstotliwości komparacji rzędu 1 kHz wartość impedancji jest zbliżona do wartości rezystancji kwantowego wzorca Halla dla plateau równego 2. W metrologicznym łańcuchu porównań, wykorzystywanym do realizacji jednostki miary pojemności, umożliwia to porównanie tych impedancji w stosunku bliskim 1:1, co jest najbardziej korzystne z metrologicznego punktu widzenia.



Rys. 1. Zestawy czteroportowych termostatyzowanych kondensatorów wzorcowych: w górnym rzędzie widoczny jest kondensator 10 nF KC0G-10nF, w dolnym od lewej: kondensatory KC0G-1XF L52-1/20, KC0G-1XF L52-2/21 i czteroportowy wzorzec rezystancji Vishay

Etapy budowy wzorców pojemności KC0G-1XF przedstawiono na rys. 2. Kondensatory SMD Murata z dielektrykiem NP0 są najpierw zatapiające w naturalnym czystym wosku, co korzystnie wpływa na długookresową stabilność parametrów wzorca. Następnie każdy pojedynczy kondensator umieszczany jest w osobnej aluminiowej obudowie pełniącej rolę ekranu, a widocznej na

górnym lewym zdjęciu na rys.2. Następnie kondensatory umieszczane są w zbiorczej obudowie metalowej z folią grzewczą i izolowane aerożelem w postaci maty izolacyjnej powstałej w procesie nanotechnologicznym.



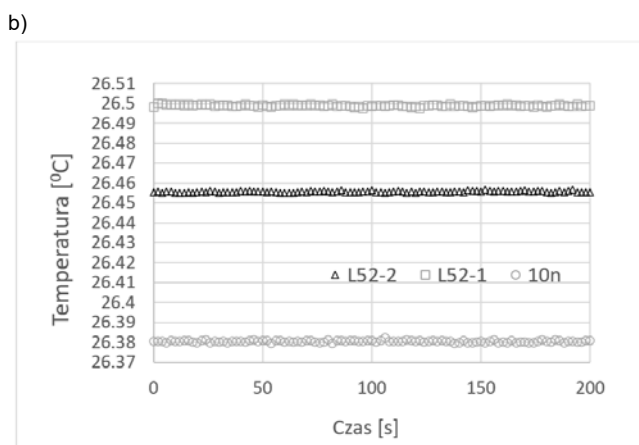
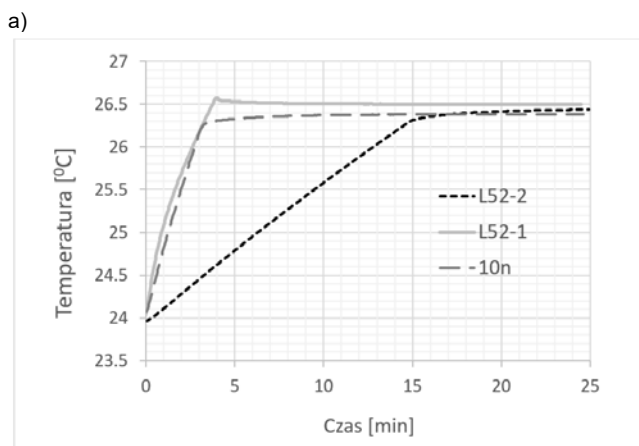
Rys. 2. Etapy budowy zestawu kondensatorów (u góry od lewej: obudowa ekranowana z pojedynczym kondensatorem i obudowa zestawu z folią grzewczą, u dołu od lewej: zestaw pięciu kondensatorów umieszczony w termostatyzowanej obudowie termicznie izolowanej aerożelem. Z prawej strony widoczny wzorzec bez górnej pokrywy obudowy)

Zastosowany aerożel ma niewielką gęstość i wyjątkowo małą przewodność cieplną 0,014 W/(m·K). Aerożele są zwykle wytwarzane na bazie krzemionki, chociaż w ostatnich latach stosuje się również nanorurki węglowe i grafen. Istnieją również aerożele na bazie zeolitów i aluminoksanów, ale zdecydowanie najszerzej stosowana jest krzemionka. Producentem zastosowanego aerożelu jest firma Aspen Aerogels z USA.

Regulator temperatury, stabilizujący temperaturę kondensatorów, jest układem elektronicznym wykorzystującym półprzewodnikowy czujnik temperatury NTC. Dodatkowy czujnik platynowy Pt100, połączony z gniazdami BNC przykręconymi do obudowy wzorca, służy do monitorowania jego temperatury. Oba czujniki są umieszczone wewnątrz obudowy. Dwustanowy sterownik elektroniczny, również osłonięty izolacją termiczną (rys. 1), stabilizuje temperaturę wewnątrz obudowy wzorca o wartości około 26,5°C z histerezą 0,01°C. Temperaturę dobrano tak, aby uzyskać możliwie małe zmiany pojemności. Zgodnie ze specyfikacją producenta ten warunek jest spełniony dla temperatury około 26-27°C [33]. Regulator temperatury zestawu wzorców zasilany jest z zewnętrznego zasilacza napięcia stałego +12 V przez czterostykowe gniazdo. W celu ograniczenia wpływu zaburzeń przewodzonych, podczas pomiarów wzorców zaleca się stosowanie zasilania akumulatorowego. Wszystkie zestawy wzorców wyposażone są w posrebrzane złącza MUSA Metrology Grade, wyprodukowane przez firmę Canford z Wielkiej Brytanii.

Wyniki badań

Stabilność i funkcjonalność termostatów wzorców pojemności KC0G-10nF, KC0G-1XF L52-1/20 i KC0G-1XF L52-2/21 zbadano w temperaturze otoczenia ($23,5 \pm 1,0$)°C, wykorzystując czteroprzewodowe czujniki rezystancyjne Pt100 wbudowane we wzorce. Pomiarów wykonano za pomocą precyzyjnego multimetru Agilent 3458A, połączonego z komputerem PC przez konwerter NI GPIB-USB. Program do akwizycji i wizualizacji wyników pomiarów napisano w środowisku LabView. Temperaturę każdego z wzorców monitorowano w odstępach dwusekundowych od momentu włączenia zasilania (co odpowiada temperaturze otoczenia) aż do osiągnięcia stanu ustalonego. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 3a i 3b, odpowiednio dla procesu nagrzewania i dla stanu ustalonego wzorców. Na wykresie 3b widocznych jest 100 ostatnich wyników pomiarów dla każdego z kondensatorów. Wyniki te potwierdzają, że zmiany temperatury w stanie ustalonym dla każdego ze skonstruowanych kondensatorów nie przekraczają 0,01°C. Nieco różne wartości temperatur ustalonych wynikają z niewielkich różnic układów regulacyjnych i nie mają znaczenia z punktu widzenia wykorzystania kondensatorów do odtwarzania jednostki miary pojemności w krajowych instytutach metrologicznych.



Rys. 3. Badania temperaturowe termostatów wzorców KC0G-10nF, KC0G-1XF L52-1/20 i KC0G-1XF L52-2/21 przy nagrzewaniu oraz w stanie ustalonym; a) etap nagrzewania, b) stan ustalony

Poza badaniem termostatów wykonano również badania stabilności samych wzorców przez wykonanie serii pięciu komparacji R-C w odstępach tygodniowych. Porównywano skonstruowane wzorce pojemności o wartościach: 10 nF, 100 nF i 1 μ F z zestawów L52-1 i L52-1, a także wzorzec KC0G-10n, z czteroportowymi wzorcami rezystancji Vishay

HZ-foil [34] o wartościach odpowiednio: 10 k Ω , 1 k Ω i 100 Ω . Stabilność temperaturowa użytych wzorców rezystancji wynosi $\pm 0,2$ ppm/°C. Poprawne wartości ich rezystancji zostały wyznaczone w szwajcarskim instytucie metrologicznym METAS przez odniesienie do rezystancji kwantowego efektu Halla. Do porównań impedancji wykorzystano cyfrowy system komparacji opisany w pracy [18]. System ten, oparty na dwukanałowym, wysokostabilnym, cyfrowym źródle napięcia przemiennego oraz komercyjnym systemie synchronicznego próbkowania PXI umożliwia porównanie dwóch dowolnych impedancji, niezależnie od ich rodzaju (R-C, R-L, lub L-C), w szerokim paśmie częstotliwości (od 20 Hz do 20 kHz). Jak wykazano w [18], porównania przy 1 kHz i 1,592 kHz w zakresie impedancji od kilkuset Ω do kilku k Ω wykazują błędy stosunku impedancji na poziomie 10^{-6} . Komparacje nowo skonstruowanych wzorców wykonano zatem przy częstotliwościach 1 kHz i 1592 Hz, co odpowiada stosunkom impedancji bliskim 1:1. W tabeli 1 przedstawiono największe rozrzuty R_r wyników modułów i faz R_ϕ stosunków impedancji otrzymane dla serii pięciu komparacji wykonanych przy częstotliwości 1 kHz i 1592 Hz w odstępach tygodniowych.

Tabela 1. Wyniki maksymalnych rozrzutów stosunków impedancji dla serii pięciu komparacji R-C przy częstotliwości 1 kHz i 1592 Hz

Porównywane wzorce	Max. R_r	Max. R_ϕ	Max. R_r	Max. R_ϕ
	$f=1$ kHz $\times 10^{-6}$	$f=1$ kHz $\times 10^{-6}$ rad	$f=1592$ Hz $\times 10^{-6}$	$f=1592$ Hz $\times 10^{-6}$ rad
100 Ω vs. 1 μ F (L52-1)	3,4	4,1	3,1	4,2
100 Ω vs. 1 μ F (L52-2)	3,1	3,7	3,3	5,0
1 k Ω vs. 100 nF (L52-1)	3,2	4,2	3,4	4,7
1 k Ω vs. 100 nF (L52-2)	2,0	4,5	3,0	4,9
10 k Ω vs. 10 nF (L52-1)	2,1	5,0	2,6	5,3
10 k Ω vs. 10 nF (L52-2)	1,9	4,4	2,2	4,8
10 k Ω vs. 10 nF (KC0G)	1,8	4,0	1,9	4,1

Otrzymane wyniki świadczą o dobrej powtarzalności pomiarów. Rozrzut na poziomie nie przekraczającym $5 \cdot 10^{-6}$ jest porównywalny z deklarowaną niepewnością pomiaru stosunku impedancji dla wykorzystanego układu komparacji.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono nowe rozwiązania konstrukcyjne wzorców impedancyjnych, które w ostatnim czasie zostały wdrożone do odtwarzania jednostki miary pojemności w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie. Wyniki testów stabilności temperaturowej jak i komparacji R-C są zgodne z parametrami projektowymi wzorców. Badania procesu stabilizacji temperatury wewnętrznego termostatu, przeprowadzone za pomocą wbudowanego czujnika Pt100, wskazują na stosunkowo szybkie (poniżej 30 minut) osiągnięcie stanu ustalonego temperatury wnętrza termostatu, a wahania temperatury po osiągnięciu stanu ustalonego mieszczą się w granicach 0,01 K. W takim przypadku składnik niepewności komparacji związany ze zmianami temperatury wzorca jest do pominięcia. Porównanie R-C wykonane z użyciem cyfrowego systemu komparacji wykazało dobrą powtarzalność i stabilność wyników pomiaru stosunków impedancji. Przedstawione w artykule wyniki porównań R-C (które są tylko niewielką częścią wszystkich badań przeprowadzonych w celu walidacji nowego systemu komparacji), świadczą o bardzo dobrych właściwościach metrologicznych wzorców i komparatora, a co za tym idzie – o ich przydatności do odtwarzania jednostek miar pojemności elektrycznej i indukcyjności w Głównym Urzędzie Miar.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Musioł, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, e-mail: Krzysztof.Musiol@PolSl.pl; Maciej Koszarny, Główny Urząd Miar, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, e-mail: Maciej.Koszarny@gum.gov.pl, prof. dr hab. inż. Marian Kampik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, e-mail: Marian.Kampik@PolSl.pl, dr inż. Witold Rządkiwicz, Główny Urząd Miar, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, e-mail: Witold.Rzodkiewicz@gum.gov.pl, Jolanta Jursza, Główny Urząd Miar, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, e-mail: Jolanta.Jursza@gum.gov.pl, Adam Ziótek, Główny Urząd Miar, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, e-mail: Adam.Ziolek@gum.gov.pl, Paweł Zawadzki, Główny Urząd Miar, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, e-mail: Pawel.Zawadzki@gum.gov.pl

LITERATURA

- [1]. Couraud B., Vauchem R., Deleruyelle T., Kussener E., A low cost impedance measurement method for integrated circuits, *IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2015, pp. 13-16
- [2]. Palethorpe B., Sumner M., Thomas D.W.P., Power system impedance measurement using a power electronic converter, *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings*, 2000, pp. 208-213
- [3]. Serrano-Finetti R. E., Pallas-Areny R., Output Impedance Measurement in Power Sources and Conditioners, *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, 2007, pp. 1-5
- [4]. Koseoglou M., Tsioumas E., Papagiannis D., Jabbour N., Mademlis C., A Novel On-Board Electrochemical Impedance Spectroscopy System for Real-Time Battery Impedance Estimation, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 9, Sept. 2021, pp. 10776-10787
- [5]. Torrents J.M., Pallas-Areny R., Measurement of cement setting by impedance monitoring, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* vol.2, 1997. pp. 1089 – 1093
- [6]. Snyder K. A., Ferraris C., Martys N. S., Garboczi E. J., Using Impedance Spectroscopy to Assess the Viability of the Rapid Chloride Test for Determining Concrete Conductivity, *NIST Journal of Research*, 105(4). 2000, pp. 497–509
- [7]. Cutkosky R. D., Four-terminal-pair networks as precision admittance and impedance standards, *Commun. Electron.*, vol. 70, pp. 19–22, Jan. 1964
- [8]. Awan S., Kibble B., Schurr J., *Coaxial Electrical Circuits for Interference-Free measurements (Electrical Measurement)*. Edison, NJ, USA: IET, 2010
- [9]. Callegaro L., *Electrical Impedance: Principles, Measurement, and Applications*, CRC Press, 1st edition, 2012
- [10]. Overney F. et al, Dual Josephson impedance bridge: towards a universal bridge for impedance metrology, *Metrologia* 57 065014, 2020
- [11]. 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* 53, 2016, 1045–1053
- [12]. Callegaro L., D'Elia V., Kampik M., Dan Bee Kim, Ortolano M., Pourdanesh F., Ngoc Thanh Mai Tran, Experiences with a two terminal-pair digital impedance bridge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64, (6), 2015, 1460 – 1465
- [13]. Rybski R., Kontorski K., Kaczmarek J.: Cyfrowy mostek impedancji na bazie komercyjnej karty akwizycji danych *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 2/2014
- [14]. Ortolano M., Palafox L., Kucera J., Callegaro L., D'Elia V., Marzano M., Overney F., Gulmez G., An international comparison of phase angle standards between the novel impedance bridges of CMI, INRIM and METAS, *Metrologia* 55, 2018, pp. 499–512
- [15]. Mašlān S., Šira M., Skalická T., Bergsten T., Four-Terminal Pair Digital Sampling Impedance Bridge up to 1MHz, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 6, June 2019, pp. 1860-1869
- [16]. 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, pp. 1-14
- [17]. Overney F., Jeanneret B., RLC Bridge based on an Automated Synchronous Sampling System, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 (7), 2011, pp. 2393 – 2398
- [18]. Musioł K., Kampik M., Koszarny M., A new sampling based four-terminal-pair digital impedance bridge, *Measurement: Sensors*, Volume 18, 2021
- [19]. Bauer S. et al., 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, pp. 152–160, Apr. 2017
- [20]. 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, pp. 1–17
- [21]. 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 comparison, *Metrologia* 53, 2016, pp. 1045-1053.
- [22]. Bauer S. et al., AC Quantum Hall Resistance combined with a Four-Terminal Pair Pulse-Driven Josephson Impedance Bridge, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, 2020, pp. 1-2
- [23]. Bauer S. et al: A four-terminal-pair Josephson impedance bridge combined with a graphene-quantized Hall resistance, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 32, no.6, 2021
- [24]. Callegaro L., D'Elia V., Francone F., Serazio D., 100 mH travelling standard for the EUROMET 607 pilot intercomparison, in *CPEM Tech. Dig.*, Ottawa, ON, Canada, Jun. 16–21, 2002, pp. 352–353
- [25]. Callegaro L., D'Elia V., Serazio D., 10-nF Capacitance Transfer Standard, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 54, No. 5, pp. 1869-1872, 2005
- [26]. Dierix E., Melcher J., Callegaro L., Final report on the supplementary comparison EURAMET.EMS26: inductance measurements of 100 mH at 1 kHz (EURAMET project 816), *Metrologia* 49 (1A), January 2012
- [27]. Callegaro L., D'Elia V., Bohacek J., Four-Terminal-Pair Inductance Comparison Between INRIM and CTU, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 1, pp. 87-93, Jan. 2009
- [28]. Callegaro L., D'Elia V., Francone F., Serazio D., 100 mH travelling standard for the EUROMET 607 pilot intercomparison, *Conference Digest Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 2002, pp. 352-353
- [29]. SIB 53 AIM QuTE final publishable JRP Report "Automated Impedance Metrology extending the quantum toolbox for electricity", EURAMET, June 2017
- [30]. 17RPT04 VerslCaL final publishable JRP Report "A versatile electrical impedance calibration laboratory based on digital impedance bridges", EURAMET, 2020
- [31]. Kampik M., Musioł K.: Investigations of the high-performance source of digitally synthesized sinusoidal voltage for primary impedance metrology, *Measurement*, 2021 vol. 168 pp. 1-9.
- [32]. Musioł K., Met A., Badania dynamiki i stabilności termostatu powietrznego dla wzorców impedancji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 7/2013, pp. 111-115
- [33]. <https://www.murata.com/en-eu/products/productdetail?partno=GRM31C5C1H104JA01%23>, specification of Murata GRM31C5C1H104JA01# capacitors, dostęp: 21.07.2022.
- [34]. www.foilresistors.com, Specification of Vishay HZ Series, Document Number: 63120, March 2010