

System do badania liniowości precyzyjnej aparatury pomiarowej

W artykule przedstawiono prototypowy system pomiarowy przeznaczony do badań nieliniowości indukcyjnych dzielników napięcia i układów próbkujących (samplerów), stosowanych w cyfrowych komparatorach impedancji. System bazuje na układzie kondensatorów przełączanych (UKP), w którym wykorzystano wyselekcjonowane kondensatory SMD z dielektrykiem NPO i wysokiej klasy przełączniki mikrofalowe. UKP został zaprojektowany z wykorzystaniem programu do modelowania 3D, a części mechaniczne prototypu wykonano przy wykorzystaniu maszyn sterowanych numerycznie (CNC) oraz technologii druku 3D

Abstract. The article presents a prototype measurement system intended for testing non-linearities of inductive voltage dividers and samplers used in digital impedance bridges. The system is based on switched capacitors (UTCOMP) consisting of selected SMD capacitors with NPO dielectric and high-class microwave relays. UTCOMP was designed using a 3D modeling program, and the mechanical parts of the prototype were made using numerically controlled machines (CNC) and 3D printing technology. (**Automated permuting capacitor device for calibration of high-precision impedance infrastructure**).

Słowa kluczowe: indukcyjny dzielnik napięcia, komparacja impedancji, kondensatory permutowane, sampler.

Keywords: inductive voltage divider, impedance comparison, permuting capacitors, digitizer.

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwowany jest dynamiczny rozwój cyfrowych układów do komparacji impedancji [1-9]. Podczas gdy krajowe instytuty metrologiczne krajów wysokorozwiniętych wdrażają mostki impedancyjne oparte na wzorcach kwantowych [1, 2], to instytucje mniejszych krajów (w tym również Główny Urząd Miar w Warszawie) koncentrują się przede wszystkim na rozwoju komparatorów wykorzystujących cyfrowe niekwantowe źródła napięcia przemiennego [3-10]. Popularność takich komparatorów wynika z faktu, że charakteryzują się niższą ceną, krótkim czasem pomiaru, łatwością obsługi oraz możliwością porównywania wzorców impedancji o dowolnym charakterze. Cyfrowe komparatory impedancji tego rodzaju umożliwiają osiągnięcie niepewności komparacji na poziomie 10^{-6} [12]. Cyfrowe komparatory impedancji można ogólnie podzielić dwie grupy. Do pierwszej z nich należą układy, w których ramionach stosunkowych znajdują się dwa źródła napięcia przemiennego o znanym zespolonym stosunku napięć, wyznaczonym na podstawie nastawy kwantowego lub cyfrowego źródła sygnału [3, 6-9]. Do drugiej grupy zalicza się układy, w których zespolony stosunek napięć jest wyznaczony poprzez próbkowanie napięć w ramionach stosunkowych za pomocą odpowiedniego układu próbkującego, np. za pomocą karty PXI-4461 [13-15]. Jednym z głównych źródeł błędów w układach z cyfrowymi źródłami napięcia są błędy wynikające z nieliniowości źródła bądź samplera [16]. Ich negatywny wpływ ujawnia się zwłaszcza przy komparacji impedancji o znacznie różniących się modułach (np. 10:1). W takim przypadku jednym ze sposobów poprawy dokładności komparacji jest pomiar błędów nieliniowości użytego źródła bądź samplera i wprowadzenie w oprogramowaniu systemu komparacji odpowiednich współczynników, korygujących zmierzony zespolony stosunek napięć. Takie rozwiązanie planowane jest w przypadku próbkującego komparatora cyfrowego aktualnie rozwijanego w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Wymaga to zastosowania precyzyjnego układu lub metody pomiarowej, pozwalającej odtworzyć wzorcowe stosunki napięć 1:n z dokładnością sięgającą $10^{-7} \div 10^{-8}$. Dostępne są w takim przypadku dwie metody: 1) zastosowanie wzorcowego wielodekadowego indukcyjnego dzielnika napięcia (IDN), np. typu Dekatran DT-72A lub Tinsley 5560J, 2) zastosowanie metody z permutacją

kondensatorów [17-19]. Na szczególną uwagę zasługuje ta ostatnia metoda, z pomocą której uzyskano niepewność wzorcowania indukcyjnego dzielnika poniżej $1 \cdot 10^{-8}$ [19]. Z uwagi na jej dużą dokładność autorzy postanowili zaprojektować i wykonać dedykowany układ z zastosowaniem przełączalnych kondensatorów. Metoda permutacji kondensatorów, znana od wielu lat [19], bazuje na układzie kondensatorów o możliwie równych pojemnościach, które mogą być łączone ze sobą równolegle. Przykładowo dla odwzorowania stosunków 1:n, gdzie $n=1 \dots 10$, potrzebnych jest 11 kondensatorów. W przypadku układu mostkowego jeden z kondensatorów jest umieszczony w górnej gałęzi mostka, natomiast pozostałe w jego dolnej gałęzi. Następnie realizowane jest cykliczne przestawienie (permutacja) kondensatora w górnej gałęzi i zastąpienie go jednym z kondensatorów połączonych wcześniej równolegle w dolnej gałęzi mostka. Sekwencja permutacyjna jest powtarzana 11-krotnie, aż każdy z kondensatorów znajdzie się w górnej gałęzi mostka. U podstaw teoretycznych metody leży uśrednianie błędów (rozumianych jako odchylenie pojemności kondensatora od wartości nominalnej) stosunku napięć po kolejnym, cyklicznym przestawieniu kondensatorów. Odwzorowanie stosunku napięć jest tym lepsze, im mniejsze są dewiacje pojemności każdego z kondensatorów podczas całego cyklu pomiarowego.

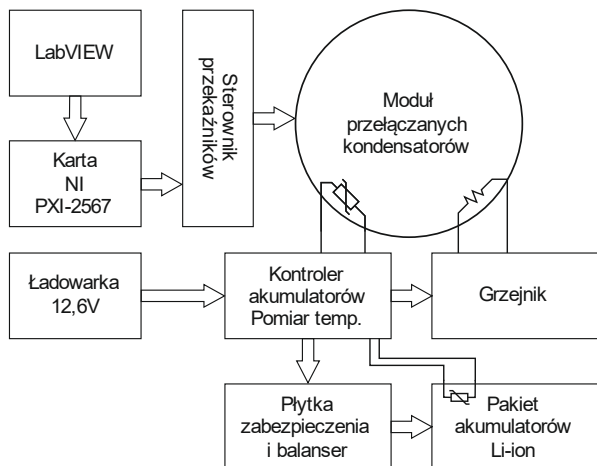
Opis układu

Moduł przełączanych kondensatorów

Schemat blokowy UKP przedstawiono na rys. 1. Centralną częścią urządzenia jest moduł przełączanych kondensatorów, którego schemat elektryczny przedstawiono na rys. 2. Moduł ten składa z 11 identycznych gałęzi, w których umieszczone są kondensatory. Kondensatory muszą charakteryzować się jak najbardziej zbliżonymi wartościami pojemności oraz współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$. Ponadto kondensatory powinny cechować się możliwie małym współczynnikiem temperaturowym pojemności, małym współczynnikiem strat dielektrycznych i dobrą stabilnością długookresową.

Z doświadczenia autorów wynika, że najbardziej odpowiednie do tego celu są kondensatory z dielektrykiem NPO (COG). Zdecydowano się zakupić partię 200 kondensatorów Murata (GRM42-6COG101J50) o wartości nominalnej 100 pF i wyselekcjonować z tej partii grupę 11

kondensatorów o najbardziej zbliżonych wartościach pojemności i $tg\delta$. Pomiaru pojemności i współczynnika strat dielektrycznych wykonano w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości Głównego Urzędu Miar przy wykorzystaniu wzorcowego mostka RLC GenRad 1689. Wyniki pomiarów parametrów kondensatorów użytych do budowy UKP przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Schemat blokowy całego urządzenia

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów kondensatorów użytych do budowy UKP. Niepewność pomiaru pojemności wynosi 0,05%.

Lp.	Pojemność C pF	Stratność $tg\delta$ $\times 10^{-5}$
-		
1	101,40	5,5
2	101,40	5,4
3	101,40	5,2
4	101,42	5,6
5	101,43	5,1
6	101,43	5,7
7	101,44	6,1
8	101,45	5,5
9	101,46	5,8
10	101,47	6,0
11	101,48	5,7

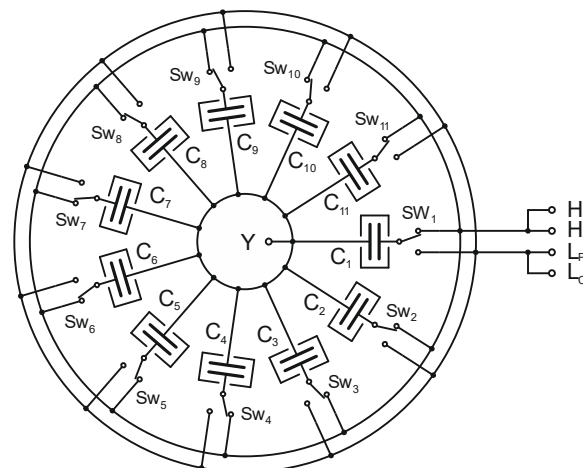
Odchylenie standardowe pojemności zestawu wyselekcjonowanych kondensatorów wynosi 0,03 pF, a odchylenie standardowe współczynnika strat dielektrycznych wynosi $0,3 \times 10^{-5}$.

W oparciu o rozwiązanie UKP opisane w [17], a zwłaszcza o raportowane problemy spowodowane wpływem pojemności pasozytnych, związanych z połączeniami kondensatorów z liniami pomiarowymi, zdecydowano się na opracowanie konstrukcji mechanicznej, która w jak największym stopniu będzie symetryczna, co pozwoli na zmniejszenie wpływu pojemności pasozytnych, występujących w układzie.

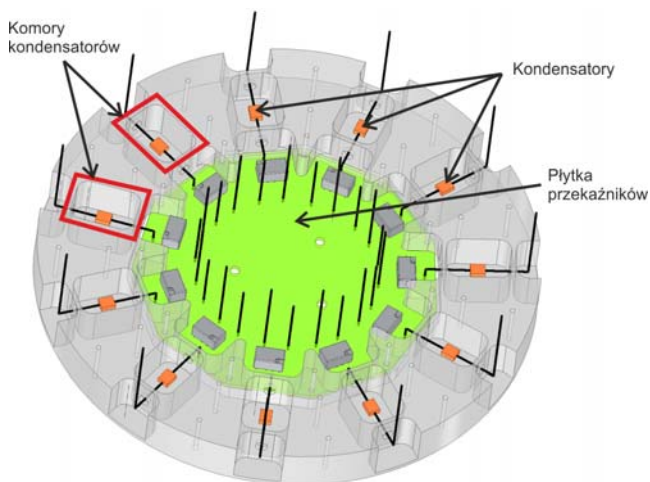
Konstrukcję UKP oparto na rozwiązaniu opisanym w [18]. Rozwiązanie to charakteryzuje się symetryczną konstrukcją, a każdy z kondensatorów został umieszczony w osobnej komorze. Z komory wyprowadzone są wyłącznie przewody łączące elektrody kondensatorów z przekaźnikami oraz z punktem wspólnym (rys.2). Łączenie poszczególnych kondensatorów do linii H_P , H_C lub L_P , L_C (rys. 2) realizowane jest za pomocą zestawu 11 przekaźników.

Elektroniczny układ sterujący jest relatywnie prosty. Elementy sterujące przekaźnikami zostały umieszczone poza ekranem. Na rysunku 3 przedstawiono widok modułu

przełączanych kondensatorów wraz z obwodem drukowanym zawierającym przekaźniki.



Rys. 2. Schemat elektryczny modułu przełączanych kondensatorów



Rys. 3. Widok modułu przełączanych kondensatorów

Kondensatory w poszczególnych gałęziach łączone są z pinami środkowymi gniazd SMA, umieszczonych w obudowie o kształcie pierścienia. Obudowa pełni jednocześnie rolę ekranu (rys. 3).

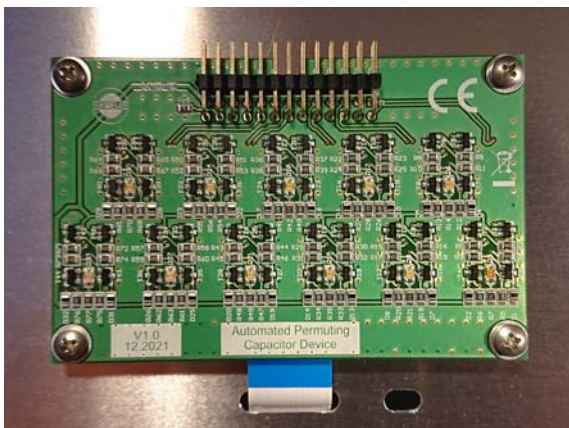
Widok zmontowanego modułu przełączanych kondensatorów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Fotografia prototypu UKP

Sterownik przełączników

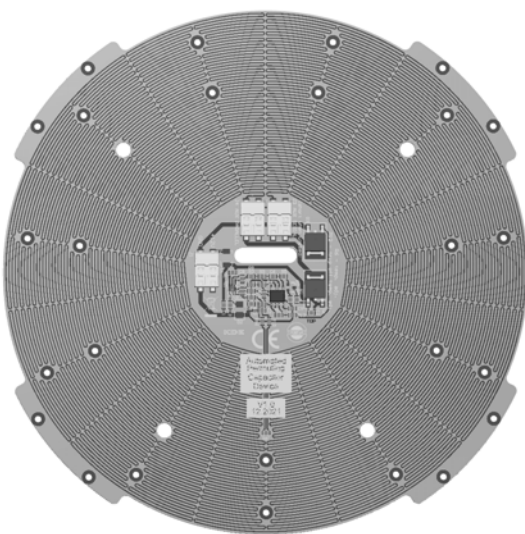
UKP jest elementem składowym cyfrowego komparatora impedancji, współpracującego z systemem PXI. Z tego powodu założono, iż sterowanie przełącznikami będzie realizowane przy wykorzystaniu karty National Instruments PXI NI-2567. Przełączniki UKP sterowane są za pomocą układu sterownika zbudowanego przy wykorzystaniu elementów dyskretnych. Jest to układ tranzystorów, które w zależności od sygnałów sterujących dostarczanych z karty PXI-2567 podają odpowiednio spolaryzowane napięcie do bistabilnych jednocewkowych przełączników. Układ zaprojektowano w ten sposób, iż w przypadku omyłkowo podanego rozkazu jednoczesnego włączenia i wyłączenia określonego przełącznika, przełącznik ten jest automatycznie wyłączany. Układ sterujący przełącznikami, przedstawiony na rys. 5, został umieszczony w tylnej części urządzenia.



Rys. 5. Widok płytki sterującej pracą przełączników

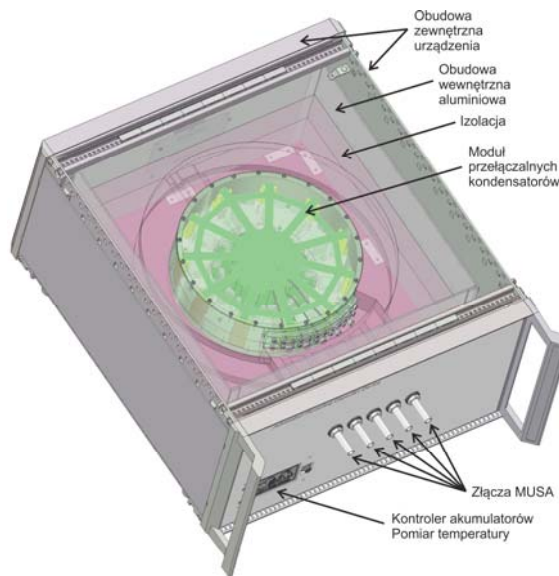
Układ stabilizacji temperatury

Dokładność UKP zależy od stabilności pojemności kondensatorów w trakcie cyklu pomiarowego. W celu zmniejszenia wpływu zmian temperatury otoczenia na parametry kondensatorów UKP, umieszczono je w zintegrowanym termostacie izolowanym termicznie za pomocą styroduru. Grzejnik termostatu wykonano w postaci ścieżki miedzianej o kształcie meandra, naniesionej na laminacie aluminiowym (rys. 6). Na laminacie umieszczono również analogowy układ stabilizacji temperatury, utrzymujący temperaturę podłoża na poziomie 28°C.



Rys. 6. Widok grzejnika modułu przełączalnych kondensatorów

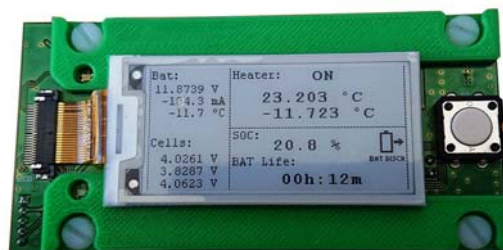
Moduł wraz z izolacją termiczną umieszczono w obudowie aluminiowej, która pełni rolę dodatkowego ekranu oraz elementu podtrzymującego izolację. Na rysunku 7 przedstawiono widok zamodelowanej obudowy całego urządzenia.



Rys. 7. Model 3D urządzenia

Pozostałe elementy składowe UKP

Układ kontrolera akumulatorów i pomiaru temperatury odpowiedzialny jest za określanie stopnia rozładowania (naładowania) akumulatorów litowo-jonowych na podstawie prądu pobieranego przez grzejnik podczas pracy lub podczas ładowania oraz napięcia, panującego na zaciskach akumulatorów. Kontroler monitoruje również temperaturę termostatu oraz akumulatorów, a ponadto pełni rolę układu zabezpieczającego przed nadmiernym rozładowaniem akumulatora zasilającego grzejnik. Gdy napięcie na pakiecie akumulatorów spadnie poniżej 9,6 V to zasilanie grzejnika jest wyłączane do chwili naładowania akumulatora do napięcia o wartości minimum 11,6 V. Kontroler wyposażony jest w energooszczędny mikrokontroler ADUCM362 firmy Analog Devices. Wykorzystany został również wyświetlacz typu e-papier, który pobiera energię tylko podczas aktualizacji wyświetlanej treści. Przykładowy widok działającego kontrolera pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowy widok działania kontrolera

Do zabezpieczenia pakietu akumulatorów zastosowano układ zabezpieczający z balanserem, dedykowany dla akumulatorów litowo-jonowych. Użycie balansera jest wymagane w celu utrzymywania jednakowego napięcia na poszczególnych ogniwach pakietu akumulatorów co wydłuża żywotność akumulatorów.

Wszystkie wyprowadzenie UKP wykonano za pomocą gniazd typu MUSA Metrology Grade, które są obecnie

powszechnie wykorzystywane w metrologii impedancyjnej najwyższych dokładności.

Podsumowanie

Opisany w pracy UKP cechuje się w pełni symetryczną konstrukcją zaprojektowaną z uwzględnieniem technik bezzakłóceńowych takich jak izolowanie elementów generujących zakłócenia, eliminowanie sprzężeń indukcyjnych czy bardzo dobre ekranowanie magnetyczne i elektryczne. Symetria konstrukcji zapewnia zmniejszenie wpływu pojemności pasożytniczych dla wszystkich możliwych kombinacji przełączeń kondensatorów w poszczególnych gałęziach układu. Krytyczne elementy UKP zostały umieszczone w termostacie. Zastosowane złącza koncentryczne MUSA ułatwiają zastosowanie urządzenia w cyfrowych komparatorach impedancji. UKP będzie sterowany programowo przy wykorzystaniu środowiska LabView. W najbliższym czasie planowane jest zbadanie właściwości metrologicznych układu i wykonanie pomiarów błędów nieliniowości samplero- w, wykorzystywanych w KMEiA do pomiaru zespolonego stosunku napięć.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki [projekt o nr 2020/37/B/ST7/00057]

Autorzy: mgr inż. Kordian Dudzik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Kordian.Dudzik@polsl.pl; dr inż. Krzysztof Musioł, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Krzysztof.Musiol@polsl.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;

LITERATURA

- [1]. F. Overney et al, Dual Josephson impedance bridge: towards a universal bridge for impedance metrology, *Metrologia* 57 065014, 2020.
- [2]. F. Overney, N.E. Flowers-Jacobs, B. Jeanneret, A.Rufenacht, A.E Fox, J.M. Underwood, A.D. Koffman and S.P. Benz, Josephson-based full digital bridge for high-accuracy impedance comparisons, *Metrologia* 53, 2016, 1045–1053.
- [3]. L. Callegaro, V. D'Elia, M. Kampik, Dan Bee Kim, M. Ortolano, F. Pourdanesh, Ngoc Thanh Mai Tran, Experiences with a two terminal-pair digital impedance bridge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64, (6), 2015, 1460 – 1465.
- [4]. Kozioł M., Kaczmarek J. and Rybski R., "Characterization of PXI-Based Generators for Impedance Measurement Setups," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 6, June 2019, pp. 1806-1813.
- [5]. Rybski R., Kontorski K. Kaczmarek J. Cyfrowy mostek impedancji na bazie komercyjnej karty akwizycji danych Przegląd Elektrotechniczny, R. 90 NR 2/2014
- [6]. M. Ortolano, L. Palafox, J. Kucera, L. Callegaro, V. D'Elia, M. Marzano, F. Overney, G. Gulmez "An international comparison of phase angle standards between the novel impedance bridges of CMI, INRIM and METAS" *Metrologia* 55, 2018, pp. 499–512.
- [7]. S. Mašláň, M. Šíra, T. Skalická and T. Bergsten, "Four-Terminal Pair Digital Sampling Impedance Bridge up to 1MHz," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 6, June 2019, pp. 1860-1869,
- [8]. F. Overney, B. Jeanneret, RLC Bridge based on an Automated Synchronous Sampling System, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 (7), 2011, pp. 2393 – 2398.
- [9]. K. Musioł, M. Kampik, M. Koszarny, A new sampling based four-terminal-pair digital impedance bridge, *Measurement: Sensors*, Volume 18, 2021
- [10]. 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
- [11]. M. Kozioł, J. Kaczmarek and R. Rybski, "Characterization of PXI-Based Generators for Impedance Measurement Setups," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 6, June 2019, pp. 1806-1813.
- [12]. S. Awan, B. Kibble, and J. Schurr, *Coaxial Electrical Circuits for Interference-Free measurements (Electrical Measurement)*. Edison, NJ, USA: IET, 2010.
- [13]. R. Rybski, J. Kaczmarek and M. Kozioł, "A PXI-Based Calibration System for Low-Value AC Resistors," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 4, April 2018, pp. 905-911.
- [14]. R. Rybski, J. Kaczmarek and M. Kozioł, "A High-Resolution PXI Digitizer for a Low-Value-Resistor Calibration System," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 6, June 2013, pp. 1783-1788.
- [15]. K. Musioł, M. Kampik, Calibration of PXI data acquisition cards used for primary impedance metrology, *Systemy pomiarowe w teorii i w praktyce. Measurement systems in theory and practice*. Pod red. Ryszarda Rybskiego. Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra, 2020, str. 159-171.
- [16]. M. Ortolano et al., "A Comprehensive Analysis of Error Sources in Electronic Fully Digital Impedance Bridges," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021, pp. 1-14.
- [17]. Hsu J.C., Gong J., Huang C., An automated permuting capacitor device for calibration of IVDs, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, September 2014, Vol. 63, No. 9,
- [18]. Waltrip B., A Programmable Capacitor for Inductance Measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, June 2017, Vol. 66, No. 6
- [19]. R. D. Cutkosky and J. Q. Shields, "The precision measurement of transformer ratios," *IRE Trans. Instrum.*, vol. 9, no. 2, pp. 243–250, Sep. 1960.