

Cyfrowy mostek impedancji na bazie komercyjnej karty akwizycji danych

Streszczenie. Przedstawiono koncepcję cyfrowego automatycznego mostka impedancji o wysokiej dokładności zbudowanego w oparciu o komercyjną kartę akwizycji danych. Podano wstępne wyniki komparacji wzorców impedancji wykonanych za pomocą opracowanego przez autorów modelu fizycznego mostka.

Abstract. The concept of a high accuracy digital automatic impedance bridge based on a commercial multifunction data acquisition card is presented. The authors developed a physical model of the bridge which was used to comparisons of impedance standards. The paper contains the preliminary results of selected comparisons. (**Digital impedance bridge based on a commercial data acquisition card**).

Słowa kluczowe: pomiary impedancji, cyfrowy mostek impedancji, generator dwufazowy, zespolony stosunek napięć

Keywords: impedance measurement, digital impedance bridge, two-phase generator, complex voltage ratio

doi:10.12915/pe.2014.02.39

Wstęp

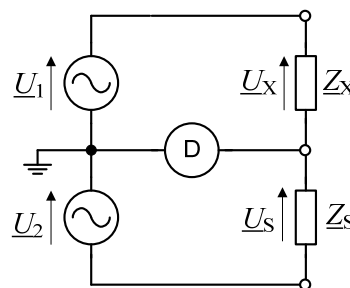
Układy przeznaczone do dokładnych pomiarów impedancji są stosowane przede wszystkim do porównań wzorców impedancji. Coraz częściej potrzeba ich stosowania wiąże się z pomiarami parametrów komponentów elektronicznych i czujników impedancyjnych. Obserwowaną tendencją, niezależnie od obszaru zastosowań, jest dążenie do automatyzacji pomiarów i rozszerzenia pasma pomiarowego przy zachowaniu wysokich wymagań w odniesieniu do dokładności. Klasyczne rozwiązania, o najwyższej dokładności są najczęściej układami mostkowymi oparte o elementy z silnym sprzężeniem magnetycznym takimi jak transformatory pomiarowe, indukcyjne dzielniki napięcia i komparatory prądów. Układy takie stosunkowo trudno poddają się automatyzacji, a ich dokładność znacząco maleje w zakresie częstotliwości wykraczających poza pasmo akustyczne. W związku z powyższym od wielu lat prezentowane są w literaturze modyfikacje układów mostkowych, które w różnicowanym stopniu wykorzystują najnowsze osiągnięcia technologiczne, przede wszystkim w obszarze przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych o wysokiej rozdzielczości oraz metodę cyfrowej syntezy częstotliwości (Direct Digital Synthesis - DDS) do generacji napięć pomiarowych, jak również mniej lub bardziej zaawansowane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów [1]. Mostki będące połączeniem elementów o silnym sprzężeniu magnetycznym i układów elektronicznych wykorzystujących technikę DDS, nazywane również mostkami wspomaganymi cyfrowo, są aktualnie najdokładniejszymi automatycznie równoważonymi układami do pomiarów impedancji [2, 3]. Równolegle rozwijane są tzw. w pełni cyfrowe mostki (mostki cyfrowe), których dokładność zależy wyłącznie od właściwości cyfrowych generatorów napięć sinusoidalnych (generatorów DDS) i cyfrowych, opartych na metodzie próbkowania, układów do pomiaru zespolonego stosunku napięć [4]. Obydwie wymienione grupy mostków zaliczane są do tzw. mostków niekwantowych. Układami o potencjalnie najwyższej dokładności są mostki Josephsona (mostki kwantowe), bazujące na kwantowych cyfrowych źródłach napięć przemiennych wykorzystujących sterowne cyfrowo matryce złączy Josephsona [5].

W klasie mostków w pełni cyfrowych istotną rolę odgrywają układy realizowane z wykorzystaniem konstrukcji komercyjnych w postaci np. wysokiej klasy kart (modułów) akwizycji danych (DAQ) czy też modułowych systemów pomiarowych klasy PXI. W pracy przedstawia się automatyczny w pełni cyfrowy mostek impedancji bazujący

na komercyjnej karcie akwizycji danych, który jest rozwinięciem wcześniejszych prac autorów w tym obszarze [6 – 9].

Zasada pomiaru impedancji w mostku z cyfrowymi źródłami napięć sinusoidalnych

Mostek z cyfrowymi źródłami napięcia w swojej podstawowej konfiguracji (rys. 1) składa się z dwóch opartych o metodę DDS źródeł napięcia sinusoidalnego o regulowanej częstotliwości, amplitudzie i fazie napięć wyjściowych \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , porównywanych impedancji \underline{Z}_X , \underline{Z}_S i wskaźnika zera D.



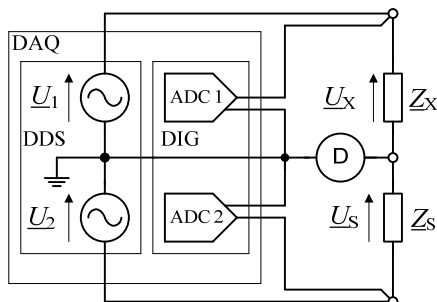
Rys. 1. Cyfrowy mostek impedancji z dwoma źródłami napięcia

Dla stanu równowagi mostka otrzymuje się następujący warunek równowagi

$$(1) \quad \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_S}$$

Teoretycznie mostek umożliwia porównywanie impedancji o dowolnych wartościach modułu i argumentu. W praktyce układ ma szereg ograniczeń. Najistotniejszym jest możliwość porównywania jedynie impedancji dwu- i trójkońcówkowych oraz dwuportowych współosiowych [6]. Porównanie elementów cztero- i piętkońcówkowych (elementy o małej wartości impedancji) i elementów czteroportowych współosiowych (pomiar o najwyższej dokładności) wymaga istotnej rozbudowy układu. Zgodnie z (1) dokładność porównania impedancji zależy od dokładności odwrotzenia stosunku napięć $\underline{U}_1/\underline{U}_2$ przez źródła napięcia. Budowa dwufazowego źródła napięcia odtwarzającego stosunek amplitud i różnicę faz napięć z niedokładnością pozwalającą na komparacje impedancji z niepewnością na poziomie 1 ppm i mniejszym jest aktualnie zadaniem bardzo trudnym do zrealizowania. Większe możliwości osiągnięcia wysokiej dokładności stwarza mostek z pomiarem zespolonego stosunku napięć, tzn. mostek, w

którym dodatkowo stosuje się układ pozwalający bezpośrednio zmierzyć stosunek napięć $\underline{U}_X/\underline{U}_S$. Pomiar ten realizowany jest z wykorzystaniem metody próbkowania, przetworników analogowo-cyfrowych (ADC) o wysokiej rozdzielczości i odpowiednich algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów. Uwzględniając powyższe oraz biorąc pod uwagę, że podstawowymi elementami cyfrowego dwufazowego źródła napięcia są przetworniki cyfrowo-analogowe (DAC) przedstawiono na rysunku 2 koncepcję cyfrowego mostka z pomiarem zespolonego stosunku napięć zrealizowanego z wykorzystaniem karty akwizycji danych (DAQ).



Rys.2. Koncepcja cyfrowego mostka impedancji z pomiarem zespolonego stosunku napięć z wykorzystaniem karty akwizycji danych

Mostek składa się z typowej karty akwizycji danych DAQ, porównywanych impedancji oraz wskaźnika zera D. W strukturze karty wyróżniono, jako bloki funkcjonalne, dwufazowy generator napięć sinusoidalnych DDS oraz złożony z dwóch przetworników analogowo-cyfrowych ADC1, ADC2 dwukanałowy moduł próbkujący (digitizer) DIG. Mostek jest równoważony poprzez regulację amplitudy i fazy napięć wyjściowych źródeł napięcia, a stosunek napięć $\underline{U}_X/\underline{U}_S$ jest mierzony za pomocą digitizera. Warunek równowagi ma postać

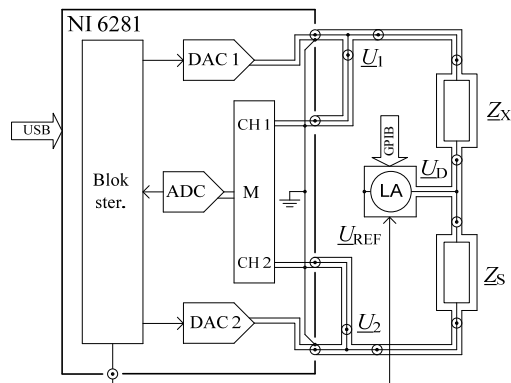
$$(2) \quad \frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_S} = A + jB$$

gdzie: A i B są równe odpowiednio części rzeczywistej i urojonej stosunku napięć $\underline{U}_X/\underline{U}_S$ zmierzonego w stanie równowagi mostka.

Układ mostka na bazie karty DAQ

Przedstawiona na rysunku 2 koncepcja mostka została zrealizowana w oparciu o wielofunkcyjną kartę DAQ/USB NI 6281. Najważniejsze, ze względu na zastosowanie w mostku, cechy karty są następujące [10]: dwa kanały wyjść analogowych wyposażone w 16 bitowe przetworniki cyfrowo-analogowe, które mogą pracować z częstotliwością do 2 MS/s i z napięciami wyjściowymi wybranymi z zakresu od ± 1 V do ± 10 V oraz 8 analogowych różnicowych multipleksowanych kanałów wejściowych współpracujących z 18 bitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Maksymalna częstotliwość próbkowania przetwornika w trybie pracy wielokanałowej wynosi 500 kS/s. Zakresy napięć wejściowych mogą być wybierane z przedziału od $\pm 0,1$ V do ± 10 V.

Uproszczony schemat blokowy opracowanego mostka przedstawiono na rysunku 3. Tworzą go wspomniana karta NI 6281 z zaznaczonymi najważniejszymi blokami (przetworniki DAC1, DAC2, ADC, multiplekser M, Blok sterujący), pełniący rolę wskaźnika zera woltomierz fazoczuły LA (Lock-in Amplifier) typ 7265 Signal Recovery oraz porównywane elementy impedancyjne. Karta akwizycji danych i woltomierz fazoczuły są sterowane przez komputer.



Rys.3. Uproszczony schemat blokowy mostka w układzie porównań impedancji dwuportowych

Opracowane oprogramowanie pomiarowe zapewnia automatyczne równoważenie mostka. W celu zrównoważenia mostka dla określonej pary porównywanych elementów impedancyjnych przyjmowane są odpowiednie warunki początkowe obejmujące wartość częstotliwości pomiarowej oraz wartości amplitud i faz napięć \underline{U}_1 i \underline{U}_2 . W kolejnych realizowanych automatycznie krokach k procesu równoważenia obliczane są i nastawiane wartości amplitudy i fazy napięcia \underline{U}_1 (\underline{U}_2 pełni rolę napięcia odniesienia) w oparciu o zmierzony stosunek napięć $\underline{U}_1/\underline{U}_2$ oraz napięcia niezrównoważenia \underline{U}_D . Algorytm równoważenia opisany jest zależnością

$$(3) \quad \underline{U}_{1,k+1} = \underline{U}_{2,k} \frac{\underline{U}_{1,k} + \underline{U}_{D,k}}{\underline{U}_{1,k} - \underline{U}_{D,k}}$$

Proces równoważenia kończy się po sprowadzeniu napięcia \underline{U}_D do odpowiednio małej wartości. Wówczas poszukiwany stosunek impedancji $\underline{Z}_X/\underline{Z}_S$ obliczany jest, zgodnie z (2), w oparciu o wyznaczone z pomiaru wartości A i B .

Porównanie impedancji

Konfiguracja mostka, jak już wspomniano, umożliwia dokładne porównania elementów impedancyjnych o trójkońcówkowym oraz dwuportowym współosiowym układzie wyprowadzeń. W związku z tym nie pozwala na dokładne porównania impedancji o małych wartościach modułu. Dalej rozważa się porównania rezystorów i kondensatorów wzorcowych. Analizowane będą porównania R-R, R-C i C-C. Przyjmuje się, że porównywane rezystory i kondensatory są reprezentowane odpowiednio przez następujące parametry szeregowego schematu zastępczego: rezystancję R i stałą czasową τ oraz pojemność elektryczną C i współczynnik strat dielektrycznych D . Uwzględniając (2) otrzymuje się następujące warunki równowagi [6]:

$$(4) \quad \frac{R_X}{R_S} = A \left(1 - \omega \tau_S \frac{B}{A} \right)$$

$$(5) \quad \omega R_X C_S = B \left(1 + D_S \frac{A}{B} \right)$$

$$(6) \quad \frac{C_S}{C_X} = A \left(1 - D_S \frac{B}{A} \right)$$

Z podanych zależności wynika, że do wyznaczenia relacji między składowymi dominującym porównywanych elementów impedancyjnych konieczna jest znajomość parametrów charakteryzujących ich składowe resztkowe. Przyjmując jednak pewne założenia można sprowadzić podane wyżej warunki równowagi do postaci

niewymagającej dokładnej znajomości wielkości resztkowych. Np. dla $\omega \leq 1 \cdot 10^4$, $\tau_s \leq 1 \cdot 10^{-7}$ s, $D_s \leq 1 \cdot 10^{-3}$ w równaniach (4)-(6) można pominąć drugi składnik w nawiasie po prawej stronie równań, popełniając przy tym błąd przybliżenia mniejszy od $1 \cdot 10^{-6}$ [6]. Należy dodać, że podane wyżej wartości stałej czasowej i współczynnika strat dielektrycznych nie są wygórowane w odniesieniu odpowiednio do typowych rezystorów i kondensatorów wzorcowych.

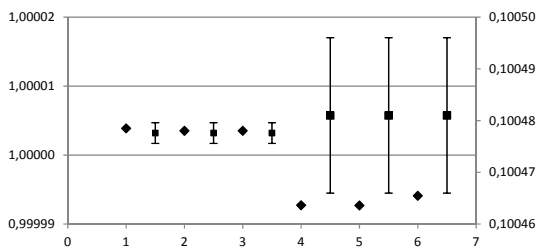
Badania eksperymentalne

Podstawowym celem badań eksperymentalnych była ocena właściwości metrologicznych opracowanego mostka. Eksperymenty obejmowały zarówno badania dwufazowego generatora DDS i digitizera (wyniki tych badań będą przedmiotem oddzielnej publikacji) jak i układu mostka. Za pomocą mostka prowadzono komparacje typu R-R, C-C i R-C. Porównywano dwuportowe rezystory wzorcowe o wartościach nominalnych 10 k Ω i 100 k Ω oraz trójkońcówkowe kondensatory wzorcowe z dielektrykiem powietrznym o wartościach nominalnych z przedziału od 1 nF do 10 nF. Pomiary prowadzono dla częstotliwości z zakresu 100 Hz – 2 kHz. Porównywane elementy umieszczone były w termostacie powietrznym, w którym utrzymywano temperaturę $23^\circ\text{C} \pm 0,05^\circ\text{C}$. Dzięki temu zminimalizowano wpływ zmian temperatury na wynik porównania (niepewność typu A). Przykładowe wyniki porównań zamieszczono w tabeli 1 i na rysunku 4.

Tabela 1. Wyniki porównań dla częstotliwości 1000 Hz

Nr serii	Porównywane impedancje	Wynik pomiaru	Wartość poprawna ¹
1	R ₁ (10 k Ω) – R ₂ (10 k Ω)	1,0000039	1,0000032
2	R ₁ (10 k Ω) – R ₂ (10 k Ω)	1,0000035	
3	R ₁ (10 k Ω) – R ₂ (10 k Ω)	1,0000032	
4	C ₁ (10 nF) – C ₂ (1 nF)	0,10046363	0,1004810
5	C ₁ (10 nF) – C ₂ (1 nF)	0,10046359	
6	C ₁ (10 nF) – C ₂ (1 nF)	0,10046546	

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów 3 serii porównań R-R i C-C wykonanych w odstępach jednodniowych. Każda z serii składała się z 5 kolejnych pomiarów, podczas których mostek równoważony był automatycznie i stosowana była metoda przestawiania. Czas równoważenia mostka wynosi ok. 90 s.



Rys.4. Porównanie wyników komparacji R-R i C-C: ♦ - wynik pomiaru za pomocą mostka, ■ – wartość poprawna

Przedstawiony na rysunku 4 wykres jest graficzną ilustracją zawartych w tabeli 1 wyników uzupełnionych o przedziały niepewności określenia wartości poprawnych. Cyfry w osi x odpowiadają numerom serii podanym w tabeli 1. Niepewność rozszerzona ($k = 2$) wartości

poprawnej stosunku odpowiednio rezystancji i pojemności wynosi $2 \cdot 10^{-6} \Omega/\Omega$ i $24 \cdot 10^{-6} \text{F/F}$. Nie zaznaczono przedziałów reprezentujących niepewności wartości zmierzonych ponieważ trwają dalsze intensywne badania mostka i tworzony jest budżet niepewności. Wstępne badania pokazują, że niepewność typu A wyników porównań jest na poziomie $1 \cdot 10^{-6}$. W przypadku komparacji R-R otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów z wartością poprawną. Wykres na rysunku 1 natomiast wyraźnie wskazuje, że wyniki porównań C-C, mimo że mieszczą się w podanym przedziale niepewności, obciążone są błędem systematycznym o wartości zbliżonej do $15 \cdot 10^{-6} \text{F/F}$, który najprawdopodobniej wynika z samego układu połączeń wzorców z mostkiem i w efekcie kolejnych eksperymentów powinien zostać wyeliminowany.

Wnioski

Przedstawiona koncepcja oraz wyniki wstępnych badań bazującego na komercyjnej karcie akwizycji danych w pełni cyfrowego automatycznego mostka impedancji wskazują na duże możliwości takiego podejścia w odniesieniu do dokładnych pomiarów impedancji. Na podkreślenie zasługuje fakt automatyzacji procesu równoważenia mostka, co w pomiarach o wysokiej dokładności nie zawsze jest zadaniem łatwym do rozwiązania. Dalsze prace zmierzają w kierunku rozszerzenia zakresu częstotliwościowego mostka, pomiaru stałej czasowej rezystorów i współczynnika stratności kondensatorów, opracowania budżetu niepewności oraz optymalizacji strategii równoważenia mostka ze względu na czas konieczny do osiągnięcia stanu równowagi.

LITERATURA

- [1] Muciek A.: Digital impedance bridge based on a two-phase generator, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46 (1997), No. 2, 467–470
- [2] Musioł K., Met A., Skubis T.: Automatic Bridge for Comparison of Inductance Standards, *Measurement*, 43 (2010), No. 10, 1661 – 1667
- [3] Trinchera B., D'Elia V., Callegaro L., A digitally assisted current comparator bridge for impedance scaling at audio frequencies, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (2013), No. 6, 1771–1775
- [4] Overney F., Jeanneret B., RLC bridge based on an automated synchronous sampling system, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (2011), No. 7, 2393–2398
- [5] Lee J., Schurr J., Nissilä J., Palafox L., Behr R., The Josephson two-terminal-pair impedance bridge, *Metrologia*, 47 (2010), 453–459
- [6] Rybski R., Impedance comparison in a circuit with two digital sinewave generators., *Metrology and Measurement Systems*, XI (2004), No. 2, 131–145
- [7] Witczak M., Rybski R., Kaczmarek J., Impedance measurement with the D-optimum experimental conditions, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58 (2009), No. 8, 2535–2543
- [8] Rybski R., Kaczmarek J., Kozioł M., A high-resolution PXI digitizer for a low-value-resistor calibration system, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (2013), No. 6, 1783–1788
- [9] Rybski R., Kaczmarek J., Kozioł M., A study of the metrological properties of a two-channel sampling module for an AC standard resistor calibration system *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.1a, 78-80
- [10] DAQ M Series User Manual. National Instruments, July 2008.

Autorzy: dr hab. inż. Ryszard Rybski, prof. UZ, E-mail: R.Rybski@ime.uz.zgora.pl; mgr inż. Kamil Kontorski, E-mail: K.Kontorski@weit.uz.zgora.pl; dr inż. Janusz Kaczmarek, E-mail: J.Kaczmarek@ime.uz.zgora.pl, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra.

¹ Wartość wyznaczona dzięki uprzejmości pracowników Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych GUM