

Ryszard RYBSKI¹, Radosław GRECH²¹ UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI, INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra² PAŃSTWOWA WYŻSZA SZKOŁA ZAWODOWA W SULECHOWIE, ul. Armii Krajowej 51, 66-100 Sulechów**Układy pomiarowe prądu przemiennego do wzorcowania rezystorów o małych wartościach rezystancji****Dr hab. inż. Ryszard RYBSKI**

Profesor nadzwyczajny na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Dyrektor Instytutu Metrologii Elektrycznej. Autor ponad 60 publikacji naukowych, w tym dwóch monografii. Główny obszar badawczy obejmuje zagadnienia związane z dokładnymi pomiarami wielkości elektrycznych, w szczególności z pomiarami impedancji.



e-mail: r.rybski@ime.uz.zgora.pl

Mgr inż. Radosław GRECH

Tytuł zawodowy mgr. inż. elektrotechniki o specjalności cyfrowe systemy pomiarowe uzyskał w 2008 roku na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Od 2008 r. pracuje jako asystent w Instytucie Politechnicznym w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Sulechowie. Obszar zainteresowań obejmuje zagadnienia związane z dokładnymi pomiarami wielkości elektrycznych oraz cyfrowym przetwarzaniem sygnałów.



e-mail: r.grech@pwsz.sulechow.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane układy pomiarowe stosowane aktualnie do wzorcowania rezystorów wzorcowych o małych wartościach rezystancji w obwodach prądu przemiennego. Przeanalizowano i porównano właściwości metrologiczne układów opracowanych przez autorów z rozwiązaniami opracowanymi i stosowanymi przez wiodące Krajowe Instytucje Metrologiczne (NMI), które umożliwiają wzorcowanie rezystorów AC w paśmie akustycznym z niepewnością na poziomie 10 ppm w odniesieniu do składowej czynnej i biernej ich impedancji.

Słowa kluczowe: pomiary małych rezystancji przy prądzie przemiennym, wzorcowanie.

AC measurement circuits for calibration of resistors of low resistance value**Abstract**

The paper presents selected measurement circuit currently used for calibration of standard resistors of small resistance value in AC circuits. Metrological properties of the circuits developed by the authors are analysed and compared with properties of circuits developed and applied in the leading NMI. These circuits allow the calibration of AC resistors in the audio band of uncertainty at the level of 10 ppm. The most important advantages and disadvantages of the basic circuits of series and parallel comparison (Fig. 1) are presented in Paragraph 2 of the paper. In the next paragraph the circuit with a magnetic current comparator (Fig. 2) developed at NRC is described, and properties of the circuit constructed by the authors, with non-simultaneous comparison and complex voltage ratio measurement are compared with those of the circuit with simultaneous comparison developed by the JEMIC (Fig. 3). In Paragraph 4 two circuits with series comparison are compared: the circuit with digital complex voltage ratio measurement developed by the authors (Fig. 6) and the circuit developed at NIST, in which the voltage ratio is determined in relation to the inductive voltage divider (Fig. 5). Selected examples of measurement circuits presented in the paper show that in NMIs calibration of a small AC resistance is based on their own solutions in the form of a prototype system or measurement set. A very important problem of small AC resistance standards, which determines the achievable calibration uncertainty, is not considered in this paper.

Keywords: AC measurement of low resistances, calibration.

1. Wstęp

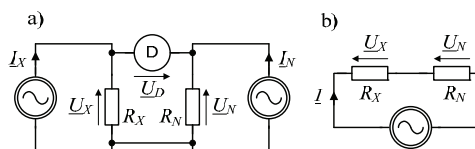
Precyzyjne rezystory o małych wartościach rezystancji (przyjmuje się zwykle, że są to wartości $\leq 10 \Omega$) spełniają w przyrządach i układach pomiarowych najczęściej funkcję przetworników prądu na napięcie. Zakres zastosowań rezystancyjnych przetworników prądu na napięcie w obwodach prądu przemiennego (AC) jest bardzo szeroki. Jednym z najważniejszych obszarów zastosowań są pomiary w elektroenergetyce. Rezystory AC (boczniki) stanowią ważny element torów pomiarowych m.in. takich przyrządów jak analizatory, rejestratory i mierniki parametrów jakości

energii elektrycznej, przetworniki mocy i prądu, amperomierze, watomierze, fazomierze, multimetry cyfrowe, elektroniczne liczniki energii elektrycznej. Stosowane są również w kalibratorach prądów i mocy, urządzeniach elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, prądowych sondach oscyloskopowych, jako obciążenie przekładników prądowych, itp.

Rosnące wymagania związane z zapewnieniem odpowiedniej jakości energii elektrycznej powodują wzrost zapotrzebowania na przyrządy o zwiększonej dokładności pomiaru w coraz szerszym paśmie częstotliwości. W odniesieniu do rezystorów wzorcowych AC powoduje to konieczność pomiaru ich rezystancji z niepewnością rzędu $10 \mu\Omega/\Omega$ w paśmie częstotliwości akustycznych. Ponadto wymagana jest coraz częściej znajomość nie tylko rezystancji AC, czy też modułu impedancji rezystora, ale również argumentu impedancji rezystorów, na podobnym poziomie niepewności. Aktualność i wagę problematyki wzorcowania rezystorów AC o małych wartościach rezystancji potwierdzają m.in. liczne w ostatnich kilku latach publikacje prezentujące wyniki prac prowadzonych przede wszystkim przez wiodące Krajowe Instytucje Metrologiczne (NMI) [np. 1, 2, 4, 7, 9]. W pracy przedstawiono wybrane układy do wzorcowania rezystorów AC o małych wartościach rezystancji opracowane w czołowych NMI i na ich tle rozwiązania proponowane przez autorów.

2. Podstawowe układy komparacji rezystorów AC

Układy stosowane do wzorcowania rezystorów przy prądzie przemiennym bazują na dwóch podstawowych metodach komparacji impedancji: metodzie komparacji równonapięciowej i metodzie komparacji równoprądowej. Schematy podstawowych układów porównania rezystorów R_X (wzorcowanego) i R_N (wzorca) przedstawiono na rys.1. Zależności (1), (2), w których symbolami Z_X i Z_N oznaczono impedancje porównywanych rezystorów, przedstawiają odpowiednio warunki komparacji obydwu układów.



Rys. 1. Podstawowe układy porównania rezystancji: a) równonapięciowy (RN), b) równoprądowy (RP)
 Fig. 1. Basic circuits for resistance comparison: a) parallel comparison (RN), b) series comparison (RP)

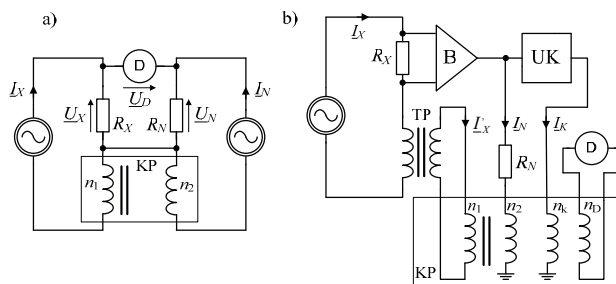
$$\frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_N} = \frac{I_N}{I_X}, \quad (1)$$

$$\frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_N} = \frac{U_X}{U_N}. \quad (2)$$

Z przedstawionych zależności wynika, że porównanie rezystora wzorcowanego R_X z wzorcem R_N sprowadza się do wyznaczenia zespolonego stosunku prądów I_N/I_X (metoda komparacji równonapięciowej – RN) lub zespolonego stosunku napięć U_X/U_N (metoda komparacji równoprądowej – RP). Właściwości metrologiczne podstawowych układów były przedmiotem wielu publikacji i są dobrze znane. W celu ułatwienia porównania właściwości przedstawianych w dalszej części pracy układów pomiarowych można przypomnieć jedynie najważniejsze cechy obydwu wymienionych wyżej rozwiązań. Ważną zaletą układu RN, istotną szczególnie w pomiarach małych rezystancji, jest rozpraszanie większej mocy w rezystorze o mniejszej rezystancji, co jest istotnym ułatwieniem w porównaniach rezystancji różniących się wartością nominalną, np. o rząd. Jego wadą jest konieczności stosowania stosunkowo rozbudowanych układów do wyznaczenia stosunku prądów. Układ RP jest natomiast stosunkowo prosty w realizacji, a dodatkowo istnieje potencjalnie możliwość minimalizacji niepewności pomiaru stosunku napięć (niektóre z niepewności składowych odejmują się). Wadą jest rozpraszanie większej mocy przez rezystor o większej wartości rezystancji. Z tego powodu najkorzystniejsze właściwości ma on przy porównaniach rezystancji o stosunku 1:1. Inną wadą układu RP, związana z bocznikującym działaniem impedancji wejściowej przyrządów mierzących spadki napięć na porównywanych elementach, ma w przypadku wzorcowania rezystorów o małych wartościach rezystancji znaczenie drugorzędne.

3. Układy komparacji równonapięciowej

W układach równonapięciowych stosunek dwóch prądów z dużą dokładnością można wyznaczyć za pomocą magnetycznego komparatora prądów przemiennych KP (rys. 2a). W stanie równowagi układu stosunek prądów I_N/I_X jest równy stosunkowi liczby zwojów n_1/n_2 . Układ o podobnej strukturze, bazujący na magnetycznym komparatorze prądów stałych, jest od wielu lat podstawowym rozwiązaniem stosowanym do wzorcowania rezystorów przy prądzie stałym [3]. Na rys. 2b przedstawiono uproszczony schemat układu do wzorcowania rezystorów AC opracowany w kanadyjskim NRC [8]. W układzie zastosowano dodatkowy transformator prądowy TP o przekładni k_T , wzmacniacz buforowy B o wzmacnieniu k_B oraz służący do zrównoważenia komparatora układ kompensacyjny UK, będący regulowanym źródłem prądu kompensacyjnego I_K . Warunek komparacji układu przedstawia zależność (3).



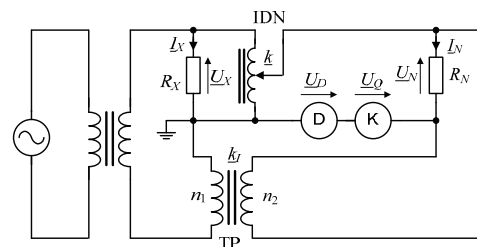
Rys. 2. Porównanie rezystancji w układzie z magnetycznym komparatorem prądów przemiennych: a) układ podstawowy, b) układ zmodyfikowany z dodatkowym transformatorem prądowym

Fig. 2. Comparison of resistance in the circuit with AC current comparator: a) basic circuit, b) modified circuit with additional current transformer

$$\frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_N} = \frac{1}{k_B k_T} \frac{n_1}{n_2} \left(1 - \frac{I_K}{I_X} \right) \quad (3)$$

Decydujący wpływ na niepewność komparacji ma dokładność określenia wzmacnienia k_B , przekładni k_T oraz błąd komparatora KP. W opisywanym układzie porównywano rezystory 0,1 Ω i 1 k Ω w paśmie do 10 kHz z niepewnością 10 ppm.

Rys. 3 przedstawia układ do wzorcowania rezystorów AC opracowany w JEMIC (Japonia) [8]. Jest to modyfikacja znanego układu pomiarowego stosowanego często m.in. do wzorcowania przekładników prądu. Przekładnia k_T transformatora TP jest tak dobierana, żeby nominalne wartości spadków napięcia na porównywanych rezystorach były jednakowe. Układ jest zrównoważony poprzez zmianę przekładni napięciowej k indukcyjnego dzielnika napięcia IDN (składowa synfazowa) oraz zmianę napięcia U_Q generowanego przez źródło napięcia kompensacyjnego K (składowa kwadraturowa).



Rys. 3. Porównanie rezystancji w układzie równonapięciowym z komparacją jednoczesną i z dodatkowym transformatorem prądowym

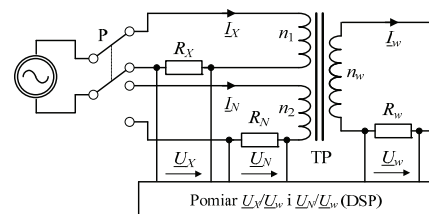
Fig. 3. Resistance comparison in parallel comparison circuit with simultaneous comparison and with additional current transformer

Warunek komparacji układu dany jest zależnością:

$$\frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_N} = \frac{k_T}{k} (1 - \underline{u}_Q), \quad (4)$$

w której $\underline{u}_Q = U_Q/U_X$. W układzie porównywano dwa rezystory o wartościach nominalnych 0,1 Ω w paśmie do 10 kHz z niepewnością 17 ppm.

Na rys. 4 przedstawiono opracowany w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego (IME UZ) układ komparacji równonapięciowej z porównaniem niejednoczesnym rezystorów R_X i R_N , w którym zastosowano dodatkowy transformator prądowy TP, natomiast stosunki spadków napięć na porównywanych rezystorach są mierzone metodą cyfrową z zastosowaniem algorytmów DSP [5, 6].



Rys. 4. Porównanie rezystancji w układzie równonapięciowym z komparacją niejednoczesną i pomiarem zespolonego stosunku napięć

Fig. 4. Resistance comparison in parallel comparison circuit with non-simultaneous comparison and complex voltage ratio measurement

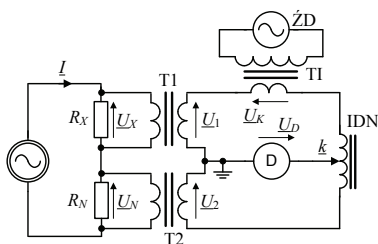
Warunek komparacji układu przedstawia zależność (5), w której A_i, B_i ($i = 1, 2$) oznaczają odpowiednio część rzeczywistą i urojoną zmierzonych stosunków napięć U_w/U_X i U_w/U_N .

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{n_2}{n_1} \frac{A_2 + jB_2}{A_1 + jB_1} \quad (5)$$

Odpowiedni dobór stosunku liczby zwojów n_1/n_2 decyduje o możliwości porównywania rezystorów o różnych wartościach nominalnych rezystancji. Podczas pomiaru obydwu stosunków napięć transformator prądowy pracuje nominalnie z taką samą wartością prądu wtórnego I_w . Dzięki temu minimalizuje się wpływ błędu przekładni transformatora na wynik porównania [5]. W układzie porównywano rezystory o wartościach nominalnych 0,1 Ω , 1 Ω i 10 Ω w paśmie do 1 kHz z niepewnością 50 ppm.

4. Układy porównania rezystancji w układzie równoprądowej

W stosowanych obecnie do wzorcowania rezystorów komparatorach równoprądowych stosunek dwóch napięć wyznaczany jest w sposób klasyczny z zastosowaniem np. indukcyjnych dzielników napięcia (rys. 5) lub w układach z cyfrowym pomiarem stosunku napięć z zastosowaniem algorytmów DSP (rys. 6).



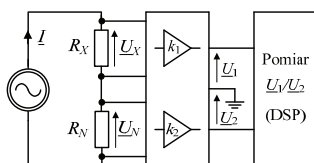
Rys. 5. Porównanie rezystancji w układzie równoprądowym z różnicowo-kompensacyjnym pomiarem zespolonego stosunku napięć

Fig. 5. Resistance comparison in the series comparison circuit with compensation of unbalanced complex voltage ratio measurement

Układ przedstawiony na rys. 5, opracowany w amerykańskim NIST [8], tworzą dwa porównywane rezystory, dwa transformatory buforujące T1, T2 o przekładniach napięciowych odpowiednio k_1 i k_2 , indukcyjny dzielnik napięcia IDN, źródło napięcia dodatkowego $\dot{Z}D$, transformator iniekccyjny TI oraz wskaźnik zera D. Wartość nominalna przekładni k dzielnika IDN zależy od stosunku wartości nominalnych rezystancji porównywanych rezystorów. Układ jest równoważony za pomocą cyfrowego źródła napięcia ($\dot{Z}D$) o regulowanej amplitudzie i fazie w odniesieniu do napięcia U_N . Warunek porównania przedstawia zależność:

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{k_1}{k_2} \left[\left(\frac{1}{k} - 1 \right) + u_K \right], \quad (6)$$

w której k_1 i k_2 oznaczają przekładnie napięciowe transformatorów odpowiednio T1 i T2, natomiast u_K jest względnym napięciem kompensacyjnym ($u_K = U_K/U_N$). Układ został zaprojektowany do porównywania rezystorów o jednakowych wartościach nominalnych rezystancji.



Rys. 6. Porównanie rezystancji w układzie równoprądowym z pomiarem zespolonego stosunku napięć z zastosowaniem DSP

Fig. 6. Resistance comparison in the series comparison circuit with complex voltage ratio measurement with use of DSP

Porównując rezystory o wartościach nominalnych 0,1 Ω osiągnięto w paśmie do 10 kHz niepewność porównania na poziomie 6 ppm.

Głównymi elementami układu z cyfrowym pomiarem zespolonego stosunku napięć (rys. 6), rozwijanego aktualnie w IME UZ, są: blok wzmacniaczy buforujących o wzmocnieniach k_1 , k_2 oraz blok pomiaru stosunku napięć U_1/U_2 . W praktycznej realizacji blok ten bazuje na komercyjnej kracie akwizycji danych o wysokiej rozdzielczości.

Warunek porównania układu z cyfrowym pomiarem zespolonego stosunku napięć przedstawia zależność:

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{k_2}{k_1} (A + jB), \quad (7)$$

w której A i B reprezentują odpowiednio część rzeczywistą i urojoną stosunku napięć U_1/U_2 wyznaczonego z próbek napięć U_1 i U_2 z zastosowaniem dyskretnego przekształcenia Fouriera. Zakłada się, że w układzie będą porównywane rezystory z zakresu od 0,1 Ω do 10 Ω z niepewnością 20 ppm w paśmie do 10 kHz.

5. Wnioski

Przedstawione w pracy wybrane przykłady układów pomiarowych wskazują, że poszczególne krajowe instytucje metrologiczne w zakresie wzorcowania małych rezystancji AC bazują na własnych rozwiązaniach w postaci prototypowych systemów lub zestawów pomiarowych. Wydaje się, że w paśmie akustycznym możliwe jest wzorcowanie rezystorów AC o małych wartościach rezystancji z zastosowaniem metod algorytmicznych z niepewnością na poziomie osiąganym aktualnie w klasycznych układach pomiarowych wykorzystujących m.in. komparatory magnetyczne i indukcyjne dzielniki napięcia. Bardzo ważnym, pominiętym w pracy problemem, są wzorce małych rezystancji AC.

6. Literatura

- [1] Budovsky I.: Standard of electrical power at frequencies up to 200 kHz. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 4, 2009.
- [2] Budovsky I.: Measurement of phase angle errors of precision current shunts in the range from 40 Hz to 200 kHz. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 2, 2007.
- [3] Miłek M.: Magnetyczne komparatory prądów w pomiarach elektrycznych. WNT, Warszawa 1990.
- [4] Pogliano U., Bosco G.C., Serazio D.: Coaxial shunts as AC-DC transfer standards of current. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 4, 2010.
- [5] Rybski R., Furmankiewicz L.: Sposób pomiaru stałej czasowej rezystora, zwłaszcza o małej wartości rezystancji. Patent PL 193738 B1, 2007.
- [6] Rybski R. Komparacja impedancji w układach z cyfrowymi źródłami napięć sinusoidalnych. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2007.
- [7] Voljc B., Lindic M., Lapuh R.: Direct measurement of AC current by measuring the voltage drop on the coaxial current shunt. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 4, 2009.
- [8] So E., Angelo D., Tsuchijama T., Tadokoro T., Waltrip B.C., Nelson T.L.: Intercomparison of calibration system for AC shunts to audio frequencies. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 2, 2005.
- [9] Zhang J., Pan X., Lin J., Wang L., Lu Z., Zhang D.: A new method for measuring the level dependence of AC shunts. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 1, 2010.