

## TESTOWY MOSTEK AKTYWNY DO POMIARÓW DUŻYCH REZYSTANCJI

Dorota KOŁAKOWSKA<sup>1</sup>, Krystian KRAWCZYK<sup>2</sup>, Michał LISOWSKI<sup>3</sup>

1. Politechnika Wrocławka, Wydział Elektryczny, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii  
tel.: 71 320 21 97, e-mail: dorota.kolakowska@pwr.edu.pl
2. Politechnika Wrocławka, Wydział Elektryczny, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii  
tel.: 71 320 21 97, e-mail: krystian.krawczyk@pwr.edu.pl
3. Politechnika Wrocławka, Wydział Techniczno-Przyrodniczy  
tel. 71 320 26 07, e-mail: michal.lisowski@pwr.edu.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono analizę testowego mostka aktywnego złożonego z kalibratorów INMEL 7000 jako źródeł napięcia i elektrometru Keithley 6517B jako detektora stanu niezrównoważenia. Przedstawiono wstępne testy mostka. Zaprezentowano algorytmy pomiarowe, a także pomiary testowe. W wyniku testów stwierdzono, iż dla rezystancji rzędu MΩ i GΩ konieczne jest zastosowanie źródeł o lepszych parametrach.

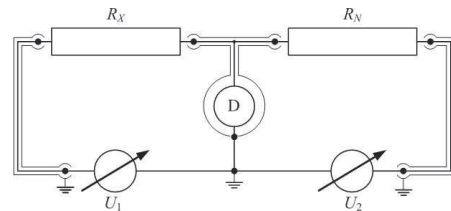
**Słowa kluczowe:** Mostek aktywny. Pomiary dużych rezystancji.

## 1. WPROWADZENIE

Do precyzyjnych pomiarów dużych rezystancji stosuje się zmodyfikowane mostki Wheatstone'a, np. mostki z precyzyjnymi dzielnikami binarnymi lub mostki aktywne. Mostki te umożliwiają precyzyjne pomiary rezystancji w zakresie od  $10^3 \Omega$  do  $10^{15} \Omega$ .

Jednym z najbardziej dokładnych jest precyzyjny mostek 6000B firmy Measurement International [1]. Podstawowym elementem tego mostka jest wysokoprecyzyjny binarny dzielnik napięcia. Mostek zasilany jest z zewnętrznego wysokostabilnego źródła napięcia (model 1000B). Detektor stanu niezrównoważenia (Fluke 8508A, Agilent 3458A, lub Keithley 2000) przyłączany jest na zewnątrz mostka. Mostek pracuje w stanie niepełnego zrównoważenia, a stan nierównowagi odczytywany jest z detektora, którym jest precyzyjny nanowoltomierz cyfrowy. Dokładność pomiarów stosunku rezystancji ograniczona jest dokładnością tego nanowoltomierza. Wartość stosunku rezystancji w zakresie  $10 \text{ k}\Omega$  -  $10 \text{ M}\Omega$ , według danych producenta, można wyznaczyć z niepewnością 0,1 ppm, a w zakresie  $100 \text{ M}\Omega$  -  $1 \text{ G}\Omega$  z niepewnością 5 ppm [1]. Mostek 6000B umożliwia pomiary rezystancji w zakresie  $10 \text{ k}\Omega$  -  $1 \text{ G}\Omega$ , a w przypadku równoległego podłączenia rezystora  $10 \text{ M}\Omega$  do rezystora mierzonego, górny zakres pomiarowy może być rozszerzony do  $1 \text{ T}\Omega$ . W tym przypadku niepewność pomiarów znacznie wzrasta, sięgając 500 ppm przy  $1 \text{ T}\Omega$ .

Pomiary rezystancji powyżej  $1 \text{ G}\Omega$  z dużą dokładnością umożliwiają mostki z aktywnymi ramionami. Twórcą takiego mostka był Lesley Henderson z NPL [2]. Jego schemat przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat mostka z aktywnymi ramionami do pomiarów dużych rezystancji

W mostku tym w dwóch gałęziach znajdują się regulowane kalibrowane źródła napięć. W stanie równowagi:

$$R_X = R_N \frac{U_1}{U_2}. \quad (1)$$

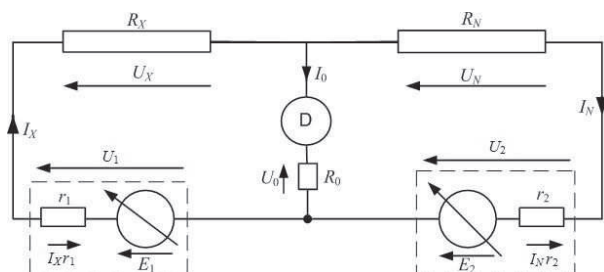
Charakterystyczną cechą tego układu jest to, że detektor oraz źródła napięć są połączone w jednym punkcie (węźle), który może mieć potencjał masy. Wówczas rezystancja izolacji podłączenia rezystorów  $R_X$  i  $R_N$  od strony źródeł napięciowych  $U_1$  i  $U_2$  bocznikuje te źródła, natomiast od strony detektora  $D$  bocznikuje ten detektor. Jeżeli detektor ma małą rezystancję, to wpływ bocznikującej rezystancji izolacji może być pomijalnie mały. Dokładność mostka zależy przede wszystkim od dokładności zastosowanych źródeł napięcia oraz od czułości detektora stanu niezrównoważenia. Należy, zatem zastosować źródła napięcia stałego o dużej dokładności oraz detektor o wysokiej czułości i odpowiedniej dokładności. W pierwszych mostkach aktywnych do pomiarów dużych rezystancji stosowano prądowe detektory, którymi najczęściej były elektrometry firmy Keithley [2, 4, 5]. Rietveld i van der Beek wykazali, że do pomiarów rezystancji do  $100 \text{ G}\Omega$  mogą być zastosowane również detektory napięciowe [3].

Obecnie mostki takie służą do najdokładniejszych pomiarów dużych rezystancji w Narodowych Instytutach Metrologicznych, m.in. w National Institute of Standards and Technology (NIST) w USA [4] i Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w RFN [5].

Autorzy również pracują nad takim mostkiem aktywnym, który będzie pracował w realizowanym przez nich systemie zapewnienia spójności pomiarowej wzorców dużych rezystancji w Głównym Urzędzie Miar (GUM) [6].

## 2. MOSTEK AKTYWNY

W analizie mostka aktywnego pracującego w stanie nierównowagi, przy zastosowaniu detektora prądowego, należy uwzględnić wartość prądu  $I_0$  (rys. 2).



Rys. 2. Schemat mostka z aktywnymi ramionami

Rozwiązując układ równań Kirchhoffa przy założeniu, że rezystancje wewnętrzne źródeł  $r_1$  i  $r_2$  są pomijalnie małe (wówczas  $E_1=U_1$ ,  $E_2=U_2$ ) otrzymuje się zależność na mierzoną rezystancję:

$$R_X = R_N \frac{U_1 - I_0 R_0}{I_0 R_N + I_0 R_0 + U_2}. \quad (2)$$

W przypadku zastosowania mostka w systemie zapewnienia spójności pomiarowej, opartym na transferach rezystancji [5], będzie on służył do porównywania wzorców dużych rezystancji o zbliżonych wartościach w stosunku 1:1 metodą przestawiania. Pomiar rezystancji  $R_X$  tą metodą wykonuje się w dwóch etapach. W pierwszym etapie

$$R_X = R_N \frac{U_1 - I_{01} R_0}{I_{01} R_N + I_{01} R_0 + U_2}, \quad (3)$$

gdzie  $I_{01}$  jest prądem wskazywanym przez detektor. W drugim etapie następuje zamiana miejscami  $R_X$  z  $R_N$  i wówczas

$$R_N = \frac{U_1 R_X - I_{02} R_0 R_X}{I_{02} \cdot R_X + I_{02} R_0 + U_2}, \quad (4)$$

gdzie  $I_{02}$  jest prądem wskazywanym przez detektor po zamianie miejscami rezystorów wzorcowych  $R_X$  i  $R_N$ . Z zależności (3) i (4) otrzymuje się wyrażenie:

$$R_X = R_N \sqrt{\frac{(I_{01} \cdot R_0 - U_1)(I_{02} \cdot R_0 + U_2)}{(I_{01} \cdot R_N + I_{01} \cdot R_0 + U_2)(R_N \cdot I_{02} - U_1 + I_{02} \cdot R_0)}}. \quad (5)$$

Jeżeli rezystancja detektora prądowego byłaby pomijalnie mała ( $R_0=0$ ), to wyrażenie (5), przyjmie postać:

$$R_X = R_N \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{I_{01} R_N}{U_2}\right) \left(1 - \frac{R_N I_{02}}{U_1}\right)}}. \quad (6)$$

Gdyby mostek pracował w stanie równowagi ( $I_0=0$ ), to po zamianie miejscami rezystorów wzorcowych  $R_X$  z  $R_N$ , napięcie źródła  $U_2$  wzrosnie do  $U'_2 = U_2(1 + \delta U_2)$ . Wówczas mierzona rezystancja

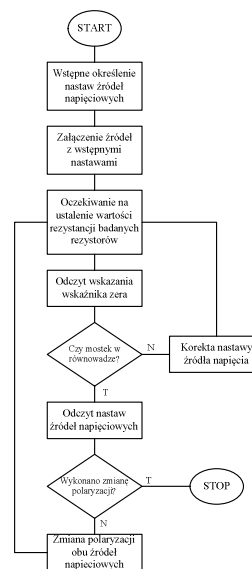
$$R_X = R_N \sqrt{\frac{U'_2}{U_2}} = R_N \sqrt{1 + \delta U_2}, \quad (7)$$

gdzie  $\delta U_2 = \frac{U'_2 - U_2}{U_2}$ .

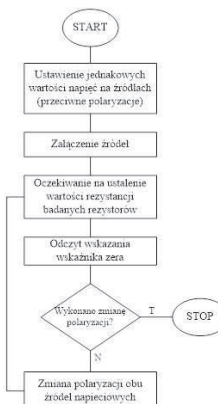
Z zależności (7) wynika, że wartość wyznaczonej rezystancji metodą przestawiania przy stosunku  $R_X/R_N$  bliskim 1 (a zatem i jej dokładność) w przypadku mostka zrównoważonego, zależy od dokładności wzorca  $R_N$  i stosunku napięć, który w tym przypadku różni się od 1 o niewielką wartość  $\delta U$ . Natomiast, jeżeli mostek pracuje, jako nierównoważony należy uwzględnić dodatkowo wartości prądów  $I_{01}$  i  $I_{02}$  wskazywane przez detektor (zależność 6). Wówczas może być nieco mniejsza dokładność pomiarów, ale będzie znacznie krótszy czas ich wykonania.

## 3. ALGORYTM POMIARÓW

Algorytm pomiarów rezystancji dla mostka zrównoważonego przedstawiono na rysunku 3, a dla mostka nierównoważonego na rysunku 4.



Rys. 3. Algorytm pomiarów dla mostka zrównoważonego

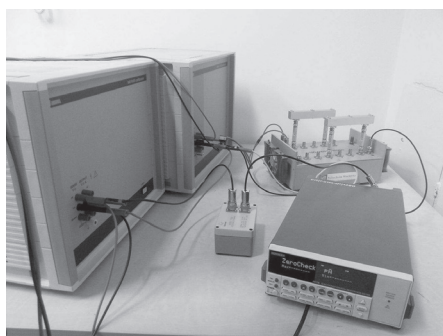


Rys. 4. Algorytm pomiarów dla mostka nierównoważonego

Dokładność pomiarów zrównoważonym mostkiem aktywnym jest ograniczona parametrami źródeł napięciowych oraz nieczułością detektora zera i może być bardzo duża. Jednak bardzo dokładne pomiary takim mostkiem są bardzo czasochłonne ze względu na długi czas oczekiwania na ustalenie się wartości rezystancji badanych rezystorów. Czasochłonność pomiarów można znacznie skrócić wykonując pomiary mostkiem niezrównoważonym. Wówczas należy uwzględnić wartości prądów  $I_{01}$  i  $I_{02}$  wskazywane przez detektor (zależność 6). Jeżeli badane rezystory mają zbliżone rezystancje, to prądy te mają małe wartości i ich udział w całkowitej niepewności pomiarów może być niewielki.

#### 4. PRZYRZĄDY ZASTOSOWANE W MOSTKU

Opracowując mostek aktywny dla potrzeb systemu zapewnienia spójności pomiarowej wzorców dużych rezystancji określono jego zakres pomiarowy, który powinien wynosić od 100 MΩ do 100 TΩ. Założono, że zakresy napięciowe źródeł napięć przy tym zakresie mierzonych rezystancji powinny wynosić od 10 V do 1000 V. Biorąc pod uwagę wymagania oraz dostępność urządzeń, które można było użyć, jako źródła napięcia, zastosowano kalibratory Inmel 7000, a jako detektor stanu niezrównoważenia - elektrometr Keithley 6517B. Widok zestawionego testowego mostka aktywnego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Zestawiony testowy mostek aktywny

#### 5. OPROGRAMOWANIE MOSTKA

Przed przystąpieniem do napisania oprogramowania określono zakres planowanych badań mostka oraz związane z tym wymagania dotyczące oprogramowania. Stwierdzono, że dla każdego typu testu konieczne jest przygotowanie odrębnego programu. Oznacza to konieczność napisania kilkunastu odrębnych programów, a to jest bardzo czasochłonne. W związku z tym na obecnym etapie opracowano jedynie oprogramowanie, w środowisku Keysight VEE, niezbędne do przetestowania możliwości sterowania poszczególnymi elementami mostka. Finalny program pomiarowy zostanie opracowany w ramach dalszych prac.

#### 6. WPŁYW ZAKŁÓCEŃ Z SIECI ZASILAJĄCEJ

Badania wpływu zakłóceń na wyniki pomiarów wykonano dla przypadku porównywania rezystorów 100 MΩ. Podczas pomiarów w przypadkowych momentach były zauważane skoki prądu  $I_0$  na detektorze. Były to zarówno kilkusekundowe wzrosty wartości, jak i dłuższe kilkudziesięciominutowe. Wartości w takich chwilach

wzrastały z kilku fA nawet do kilkuset fA. Postawiono hipotezę, że powodem tego mogą być zakłócenia dostające się do układu pomiarowego poprzez sieć zasilającą. W celu weryfikacji tej hipotezy przeprowadzono następujący eksperyment. Zrównoważono mostek, po czym w innym pomieszczeniu, podłączonym do tej samej sieci zasilającej, włączono trzy silniki elektryczne i obserwowano zmianę wskazań detektora. Największą zmianę zaobserwowano podczas włączania silników, następnie podczas pracy wartości różniły się o kilkadziesiąt fA od wcześniejszej wartości. Natomiast po wyłączeniu silników wskazanie detektora wróciło do początkowej wartości (tab. 1).

Tab. 1. Wpływ zakłóceń z układu zasilania

$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$I_0$ [fA]	uwagi
10,00	-9,85	0,4	silniki wyłączone
10,00	-9,85	ok. 800	włączenie silników
10,00	-9,85	ok. 90	praca silników
10,00	-9,85	ok. - 50	wyłączenie silników
10,00	-9,85	0,6	silniki wyłączone

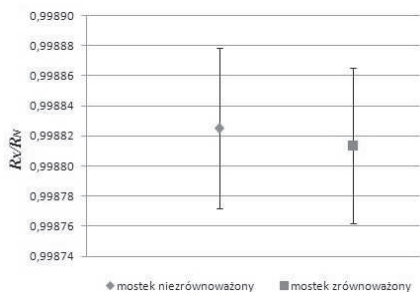
W celu eliminacji tych zakłóceń układ pomiarowy podłączono do zasilania poprzez UPS, który wyposażony jest w filtry, minimalizujące zakłócenia pochodzące z sieci energetycznej. Po dokonaniu zmian w układzie zasilania badanie powtórzono. Tym razem załączenie silników nie wpłynęło na zmianę prądu wskazywanego przez detektor.

#### 7. EKRANOWANIE PRZEWODÓW

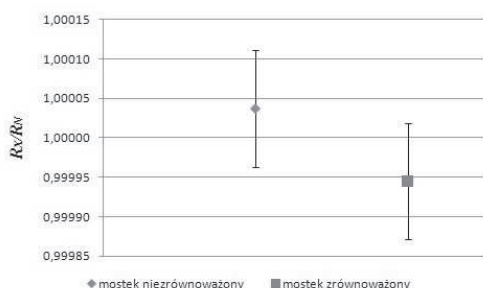
W pierwszych testach mostka aktywnego do połączenia elementów mostka zastosowano przewody, dotychczas posiadane, które nie zapewniały pełnego ekranowania. W trakcie testów zauważono, że poruszanie się osoby obsługującej mostek lub wejście do laboratorium kolejnej osoby, w istotny sposób wpływało na wskazania detektora oraz na jego stabilność. Aby wyeliminować wpływ osób obsługujących na wyniki pomiarów opracowano nowy sposób połączenia przewodów z wykorzystaniem specjalnego rozdzielacza typu Triax oraz wykonano specjalne przewody z podwójnym ekranowaniem z końcówkami typu Triax. Po zastosowaniu nowego połączenia elementów mostka uzyskano pełne ekranowanie, dzięki czemu problemy z wpływem osób, przebywających w laboratorium, na wyniki pomiarów zostały rozwiązane.

#### 8. POMIARY TESTOWE

W ramach realizowanych badań przeprowadzono pomiary dla tych samych zestawów rezystorów mostkiem zrównoważonym i niezrównoważonym, a następnie sprawdzono, czy uzyskane stosunki rezystancji są ze sobą zgodne. Przykładowe wyniki tych badań zaprezentowano w postaci diagramów na rysunkach 6 i 7. Na diagramach tych widać, że wartości stosunku rezystancji  $R_X/R_N$ , wyznaczone mostkiem zrównoważonym i niezrównoważonym, wraz z ich niepewnościami zazębiają się. Czyli można je uznać za poprawne.



Rys. 6. Wartości stosunku  $R_X/R_N$  dla mostka zrównoważonego i niezrównoważonego dla rezystorów 100 MΩ



Rys. 7. Wartości stosunku  $R_X/R_N$  dla mostka zrównoważonego i niezrównoważonego dla rezystorów 100 GΩ

Kolejnym etapem badań była próba przeniesienia wartości rezystancji od 100 MΩ do 100 TΩ przy pomocy transferów [6] i z wykorzystaniem mostka aktywnego. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki pomiarów mostkiem aktywnym

Wartość nominalna wzorca	Wartość wyznaczona $R_X[\Omega]$	Niepewność względna $w(R_X)$ [%]
100 MΩ	$9,9993 \times 10^7$	0,005
1 GΩ	$9,9970 \times 10^8$	0,009
10 GΩ	$9,9995 \times 10^9$	0,007
100 GΩ	$9,9993 \times 10^{10}$	0,011
1 TΩ	$1,0003 \times 10^{12}$	0,010
10 TΩ	$1,0206 \times 10^{13}$	0,025
100 TΩ	$1,0492 \times 10^{14}$	0,033

Analizując wyniki z tabeli 2 można zauważyć, że dla rezystancji rzędu TΩ możliwe jest uzyskanie satysfakcjonujących wyników z zastosowaniem średniej klasy źródeł napięcia. W przypadku rezystancji rzędu MΩ

i GΩ, aby uzyskać wyniki pomiarów z odpowiednią dokładnością, konieczne jest zastosowanie źródeł o najwyższych parametrach.

## 9. PODSUMOWANIE

W ramach zrealizowanych prac określono najważniejsze czynniki wpływające na dokładność mostka aktywnego. Opracowano projekt umożliwiający minimalizację wpływu tych czynników, określono algorytmy pomiarowe, przeprowadzono wstępne testy oprogramowania dla poszczególnych elementów mostka oraz wykonano pomiary testowe. W wyniku testów stwierdzono, że możliwe jest opracowanie mostka aktywnego z zastosowaniem kalibratorów Inmel 7000 oraz elektrometru Keithley 6517B o wysokiej dokładności dla rezystancji rzędu TΩ. Natomiast dla rezystancji rzędu MΩ i GΩ konieczne jest zastosowanie źródeł o lepszych parametrach.

## 10. BIBLIOGRAFIA

1. Measurement International: Model 6000B Automated 100 Volt High Resistance Bridge datasheet.
2. Henderson L. C. A.: „A new technique for the automated measurement of high valued resistors”, J. Phys. Electron. Sci. Instr. 20, pp. 492-495, Sept. 1987.
3. Rietveld G., van der Beek J. H. N.: „Automated High-Ohmic Resistance Bridge with Voltage and Current Null Detection”, IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. 62, No. 6, pp. 1760-1765, June 2013.
4. Jarret D. G.: „Automated Guarded Bridge for Calibration of Multimegohm Standard Resistors from 10 MΩ to 1 TΩ”, IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. 46, No. 2, pp. 325-328, April 1997.
5. Schumacher B., Melcher J.: „Automated high-value resistance calibration up to 1 PΩ”, in Proc. CPEM Conf. Dig., pp. 635-636, 2010.
6. Lisowski M., Krawczyk K.: „Resistance Scaling from 10 kΩ up to 100 TΩ with New Designs of Hamon Transfer Devices”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 62, No. 6, pp. 1749- 1754, June 2013

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych, projekt PBS3/A4/11/2015.

## TEST ACTIVE BRIDGE FOR HIGH RESISTANCE MEASUREMENTS

The most accurate high resistance measurements are carried out with bridge methods based on modified Wheatstone's a bridge with precision binary dividers or active arm bridge. These bridges allow precise measurements of resistance in the range from  $10^3 \Omega$  to  $10^{15} \Omega$ .

Resistance measurements above 100 MΩ with the highest precision can be done with active arm bridge. Research on such bridge has been taken in a few of the National Metrology Institutes, i.e. The National Institute of Standards and Technology (NIST) in the USA, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Also the authors of this paper develop such bridge as part of a research project. This bridge will be used in the resistance unit transfer system to calibrate (scale) high value standard resistors in relation to high resistance transfer devices.

**Keywords:** Active arm bridge. High resistance measurements.