

Mostek zasilany dwuprądowo – eksperyment symulacyjny

Adam Idźkowski,
Jarosław Makal *

Dokonano symulacji komputerowej mostków zasilanych dwuprądowo. Przeprowadzono analizę czułości i przedstawiono ją dla dwóch rozwiązań układowych mostka. Zaproponowano nowe rozwiązanie do pomiaru różnicy dwóch rezystancji z zastosowaniem sprzężenia zwrotnego. Oszacowano jego właściwości metrologiczne.

A bridge supplied by two current sources – simulation. The computer simulations of the bridges supplied unconventionally by two current sources have been performed. DC sweep analysis of voltage sensitiveness of two circuits had been made. A new solution to measure the difference of two resistances with a feedback has been proposed. The metrological properties of this circuit have been estimated.

Przegląd układów współpracujących z czujnikami rezystancyjnymi

Szereg rozwiązań układów do pomiaru rezystancji zapewnia bezpośrednie kondycjonowanie sygnałów z rezystancyjnych czujników pomiarowych. Stosuje się w nich mostki Wheatstone'a, pętlę prądową Andersona [1], wzmacniacze operacyjne, które umożliwiają linearyzację sygnału wyjściowego oraz dopasowanie go do współpracy z przetwornikiem analogowo-cyfrowym [2]. W zależności od zastosowania, spotyka się też proste układy ze źródłami prądowymi pojedynczymi lub podwójnymi oraz ze wzmacniaczami operacyjnymi. Istnieją także rozwiązania znacznie upraszczające strukturę toru pomiarowego, w których stosuje się wewnętrzny wzmacniacz przetwornika sigma-delta jako wzmacniacz wejściowy toru pomiarowego [3]. Wydawałoby się więc, że w układach do pomiaru rezystancji nic nowego nie da się już wymyślić. Jednakże w ostatnich latach pojawiło się kilka publikacji z Warszawy na temat tzw. mostków zasilanych dwuprądowo, które w niekonwencjonalny sposób umożliwiają pomiary rezystancji [4–8]. Niniejszy artykuł jest próbą

uzupełnienia analizy metrologicznej takich mostków o eksperyment symulacyjny. Ponadto autorzy prezentują w nim koncepcję nowego układu do pomiaru różnicy dwóch rezystancji.

Mostki zasilane dwuprądowo – wybrane właściwości

Mostki zasilane dwuprądowo łączą w sobie cechy układów mostkowych i kompensacyjnych [4]. Przy ich stosowaniu wykorzystuje się stany równowagi układu, czyli równości potencjałów dwóch węzłów A i B, lub C i D (rys. 1).

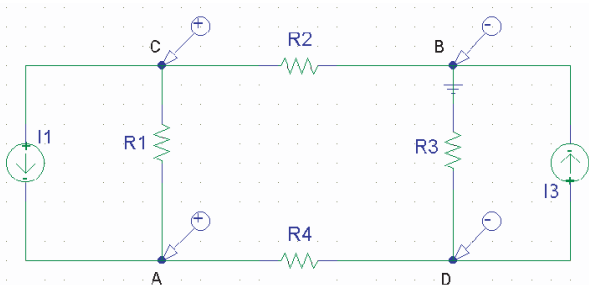
W porównaniu z klasycznym mostkiem Wheatstone'a, mostek dwuprądowy charakteryzuje się następującymi cechami:

- jest zasilany z dwóch źródeł prądowych włączonych względem układu w zgodnym kierunku – na wzajemne wspomaganie się; takie zasilanie eliminuje wpływ rezystancji połączeń na wynik pomiaru
- przy $I_1 = I_3 = I$ ma dwa następujące sygnały wyjściowe:

$$U_{AB} = \frac{I \cdot (R_1 \cdot R_4 - R_3 \cdot R_2)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (1)$$

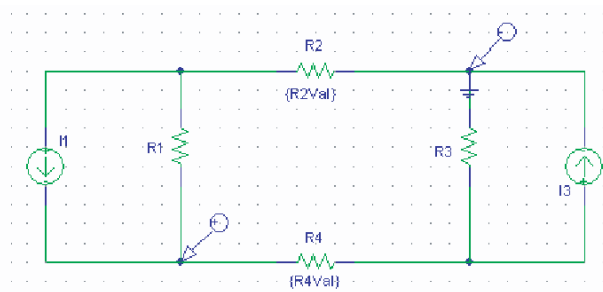
$$U_{CD} = \frac{I \cdot (R_3 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_2)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (2)$$

- z (1) i (2) wynika, że są dwa stany równowagi takiego mostka osiągnane poprzez regulację wartości rezystancji jego gałęzi
- istnieje także możliwość dodatkowego, niekonwencjonalnego równoważenia mostka za pomocą regula-



Rys. 1. Mostek dwuprądowy (I_1, I_3 – idealne źródła prądowe, R_1, R_2, R_3, R_4 – rezystancje gałęzi)

* Mgr inż. Adam Idźkowski, dr inż. Jarosław Makal – Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny



Rys. 2. Mostek zasilany dwuprądowo (R_4 – rezystancja mierzona, R_2 – rezystancja równoważąca)

cji jednego ze źródeł prądowych (układ taki nie jest analizowany w tym artykule).

Mostki te mają porównywalną czułość w stosunku do mostka Wheatstone'a [5]. Mogą pracować jako odchyłowe lub zrównoważone. W porównaniu do mostka klasycznego mają jednak tę zaletę, że umożliwiają pomiar nie tylko jednej, ale również dwóch rezystancji jednocześnie lub też różnicy wartości tych rezystancji.

Modele układów mostków dwuprądowych poddano symulacji za pomocą programu PSpice [9].

Założenia wstępne do symulacji w programie PSpice

Aby sprawdzić czułość układu przebadano dwa warianty mostka (rys. 2 i 5) przy różnych parach regulowanych oporników. Założono zmiany rezystancji mierzonych w zakresie (0;1) k Ω . Wraz ze zmianą rezystancji mierzonej zmienia się napięcie wyjściowe, które oznaczono U_{AB} ; U_{ABmin} i U_{ABmax} oznaczają wartości tego napięcia na początku i końcu zakresu pomiarowego. Dla ułatwienia analizy wprowadzono także parametry m i n , które określają stosunki wartości rezystancji gałęzi $m = R_{20}/R_{10}$, $n = R_{40}/R_{10}$, a R_{10} , R_{20} , R_{40} to (odpowiednio) rezystancje R_1 , R_2 , R_4 w stanie równowagi mostka.

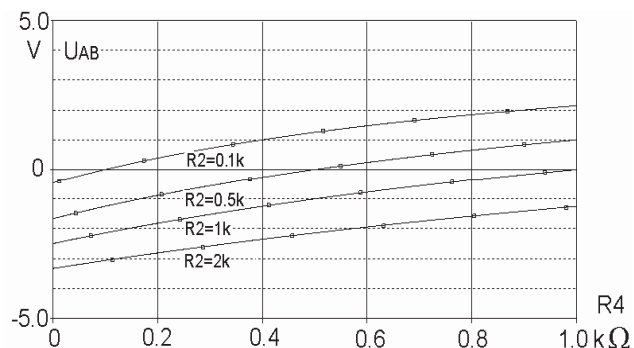
Terminem czułość określa się tu zmianę wartości napięcia wyjściowego mostka będącego w stanie równowagi przy zmianie rezystancji mierzonej o 1 Ω .

Analizę numeryczną przeprowadzono dla niewielkich wartości prądów źródeł (10 mA). W praktyce źródła o takich wartościach można zbudować, używając układów scalonych dostępnych na rynku. Pliki wynikowe z programu PSpice wyeksportowano do MSExcel.

Pomiar jednej rezystancji – analiza czułości

Na rys. 2 przedstawiono mostek, w którym R_4 jest rezystancją mierzona, a rezystancja R_2 służy do równoważenia mostka.

Mostek jest zrównoważony gdy $R_4 = R_2$, wtedy napięcie $U_{AB} = 0$ (rys. 3). Dla $R_2 < R_{2max}$, różnica $U_{ABmin} - U_{ABmax}$ jest w przybliżeniu stała, ale w miarę zbliżania się R_2



Rys. 3. Zależność napięcia wyjściowego U_{AB} od rezystancji mierzonej R_4 dla różnych wartości R_2 ($R_1, R_3 = 500 \Omega$)

do wartości R_{2max} czułość początkowa (w stanie równowagi mostka) maleje. Zakres mierzonych rezystancji R_4 zależy od wartości R_2 . Jeśli $R_2 > R_{4max}$, to układ nigdy nie osiągnie stanu $U_{AB} = 0$. Oznacza to, że układ ten jest najbardziej czuły, gdy rezystancja $R_4 \ll R_{2max}$.

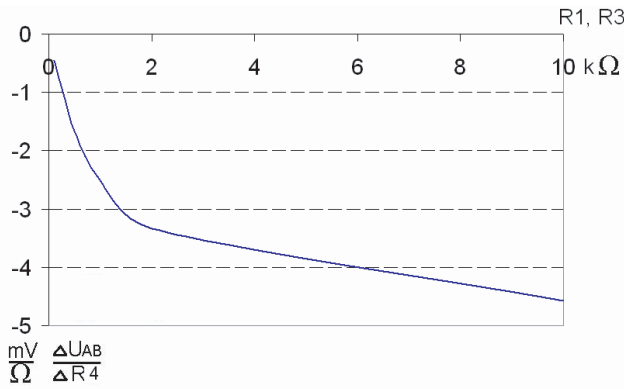
Pewną wadą tego układu jest jednak nieliniowość zmieniająca się czułość w całym zakresie mierzonych rezystancji. Czułość jest proporcjonalna do R_{10} [4–8]. Zwiększanie w tym samym układzie wartości $R_1 = R_3$, przy stałej wartości R_2 , powoduje więc zwiększenie czułości (rys. 4a). Zatem przy takim założeniu czułość tego mostka jest tym większa im mniejsza jest wartość $m = n$. Poprawia to także liniowość charakterystyki. Jednak współczynnik nieliniowości f_{UAB} określony wzorem:

$$f_{UAB} = \frac{U_{AB} - U_{ABL}}{U_{ABmax} - U_{ABmin}} \cdot 100\% \quad (2a)$$

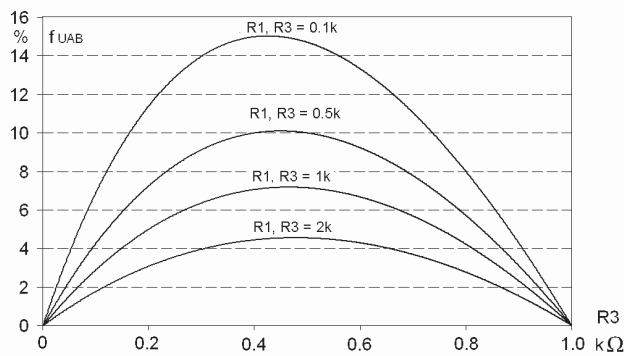
gdzie U_{ABL} jest to zlinearyzowana wartość napięcia wyjściowego U_{AB} w przedziale $\langle U_{ABmin}; U_{ABmax} \rangle$. Jest on nadal duży – ponad 5 % (rys. 4b). Układ ten dla dużych przyrostów rezystancji wymaga więc korekcji nieliniowości po stronie cyfrowej.

Przebadano zatem jeszcze raz układ mostka dwuprądowego, ale tym razem z R_3 jako rezystancją mierzona (rys. 5). Najpierw znaleziono wartość n przy $R_1 \cdot R_4 = const$, dla której układ ten ma największą czułość (rys. 6a) Otrzymano przebieg czułości napięciowej podobny jak w [5]. Łagodne maksimum występuje dla wartości $R_1 = R_4$ czyli dla $n = 1$. Niefortunnie okazuje się jednak, że dla tej wartości n współczynnik nieliniowości f_{UAB} w zakresie mierzonych rezystancji osiąga największą, kilkuprocentową wartość (rys. 6b). Z kolei dla $n = 400$ współczynnik nieliniowości układu wynosi już mniej niż 1 %, co odbywa się kosztem około pięciokrotnie mniejszej czułości. Dla stałego $n = 1$ czułość początkowa mostka rośnie wraz ze wzrostem m (rys. 7). Zmniejsza się wtedy m -krotnie wartość rezystancji R_3 , przy której występuje stan równowagi.

Układ z rys. 5 ma lepsze właściwości metrologiczne niż układ z rys. 2. Dla $n = 1$ jego czułość jest maksymalna. Jeśli $m/n = const$, to można przyjąć, że czułość



Rys. 4a. Czulość mostka w funkcji rezystancji $R_1 = R_3$ ($R_2 = 1000 \Omega$)



Rys. 4b. Nieliniowość napięcia wyjściowego w funkcji rezystancji mierzonej R_4 dla różnych wartości rezystancji $R_1 = R_3$ ($R_2 = 1000 \Omega$)

statyczna w mierzonym zakresie jest stała. Mostek taki może pracować jako odchyłowy dla zmiennej rezystancji R_3 .

Układ do jednoczesnego pomiaru wartości dwóch rezystancji

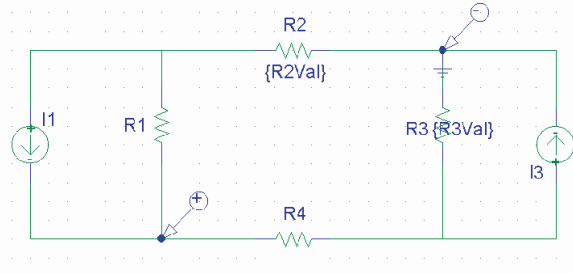
Przedstawiono sposób wykonywania jednocześnie pomiaru dwóch różnych rezystancji za pomocą mostka dwuprądowego (rys. 2). Aby zmierzyć rezystancje R_{2Val} oraz R_{4Val} , przy stałych prądach źródeł I_1 , I_3 , należy poprzez regulację R_1 i R_3 doprowadzić układ do stanu równowagi.

Z zależności (2) wynika, że można zrównoważyć układ tak, aby $U_{CD} = 0$. Zachodzi to gdy:

$$R_{2Val} = \frac{R_3 \cdot R_{4Val}}{R_1} \quad (3)$$

przy czym wartość R_{4Val} jest nieznana. Podstawiając zależność (3) do (1), otrzymuje się:

$$R_{4Val} = \frac{-U_{AB} \cdot (R_1 + R_3)}{U_{AB} \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} + 1\right) - I \cdot \left(R_1 - \frac{R_3^2}{R_1}\right)} \quad (4)$$

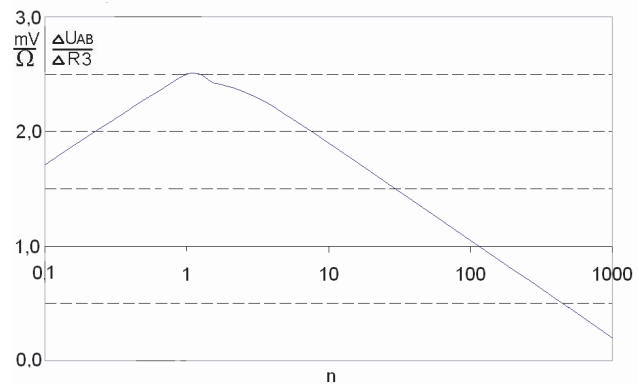


Rys. 5. Mostek zasilany dwuprądowo (R_3 - rezystancja mierzona, R_3 - rezystancja równoważąca)

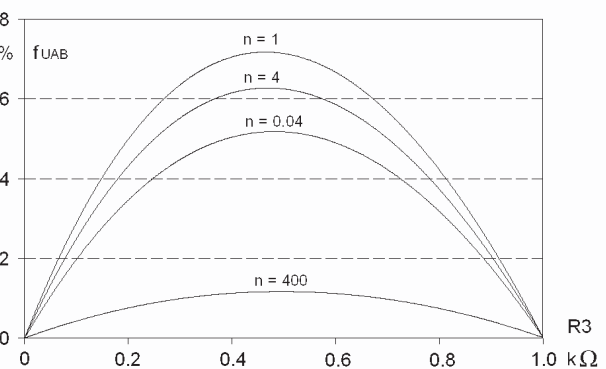
R_{4Val} jest dość złożoną funkcją napięcia U_{AB} , prądu źródeł zasilających oraz wartości rezystancji R_1 i R_3 . Podstawiając obliczoną wartość R_{4Val} z zależności (4) do zależności (3), otrzymuje się R_{2Val} .

Okazuje się więc, że za pomocą mostka dwuprądowego można zmierzyć dwie rezystancje jednocześnie w różnych gałęziach. Cechy tej nie ma mostek klasyczny. Na rys. 8 przedstawiono przebieg wartości napięć U_{AB} i U_{CD} . Dla $U_{CD} = 0$ otrzymuje się niezerową wartość U_{AB} , która przy parametrach $I = 10 \text{ mA}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ i $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$, daje wyniki: $R_4 = 250 \Omega$ i $R_2 = 500 \Omega$.

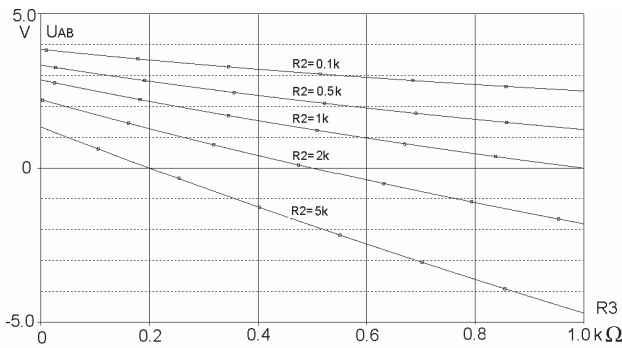
Należy dodać, że układ ten służy do pomiaru dwóch rezystancji o różnych wartościach. Gdy rezystancje są jednakowe, układ osiąga stan pełnej równowagi $U_{AB} = 0$,



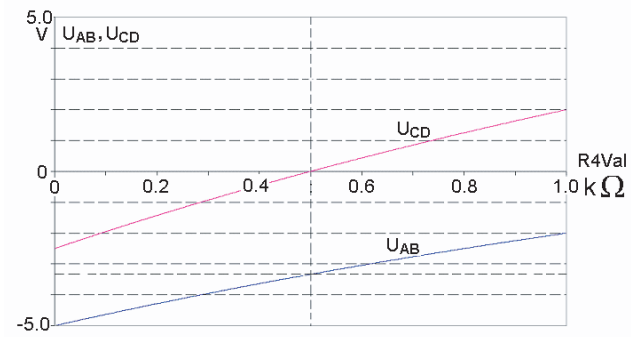
Rys. 6a. Zależność czulości od wartości n ($m = 2$)



Rys. 6b. Wpływ wartości n na liniowość napięcia U_{AB} ($m = 2$)



Rys. 7. Zależność napięcia wyjściowego U_{AB} od rezystancji mierzonej R_3 dla różnych wartości R_2 (m)



Rys. 8. Zależność U_{AB} i U_{CD} w funkcji mierzonej rezystancji R_4 . Wartość drugiej mierzonej rezystancji R_2 jest określana gdy $U_{CD} = 0$, na podstawie otrzymanej wartości napięcia U_{AB}

$U_{CD} = 0$. Napięcia wyjściowe charakteryzują się dużą, ale jednakową nieliniowością, której wykresy przedstawiono na rys. 9.

Układ ze sprzężeniem zwrotnym do pomiaru różnicy dwóch rezystancji

Omówione poprzednio układy charakteryzowały się nieliniowością sygnałów wyjściowych przy dużych przyrostach. Wyeliminowano ją, biorąc za wzór rozwiązania układowe mostka Wheatstone'a z linearyzacją za pomocą sprzężenia zwrotnego [2]. Zaproponowano układ jak na rys. 10. Pomiedzy węzły C i D wstawiono wzmacniacz operacyjny, tak aby mierzona rezystancja R_4 znajdowała się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Wyjście wzmacniacza dołączono do węzła C.

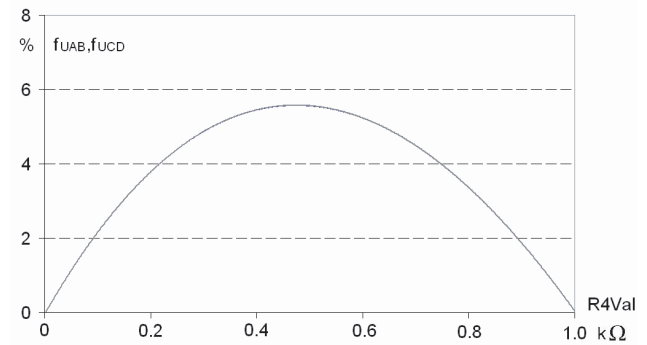
Otrzymano układ do pomiaru rezystancji R_4 (lub R_2) lub też różnicy tych rezystancji ΔR (rys. 11).

Poniższe rozważania przedstawiono dla mostka o zakresie mierzonych rezystancji od $R_{4min} = 0$ do $R_{4max} = 1$ k Ω dla $R_{2max} = 1$ k Ω .

Jeżeli R_4 jest rezystancją mierzoną, to R_2 służy do równoważenia mostka i w stanie równowagi $R_4 = R_2$. Natomiast jeżeli obie rezystancje R_2 i R_4 są nieznane, ale mniejsze niż R_{2max} i R_{4max} oraz $R_2 \leq R_4$, to różnica mierzonych rezystancji jest opisana zależnością $\Delta R = U_{AB}/I$, a gdy $R_2 \geq R_4$, wtedy $\Delta R = -U_{AB}/I$.

Z przeprowadzonych symulacji (rys. 12) wynika, że zależności te obowiązują gdy $n \geq 10$, gdzie $n = R_1/R_{4max}$, a $R_1 = R_3$.

Dla źródeł o wydajnościach prądowych $I = 10$ mA oraz przy $n = 10$, układ ten osiąga czułość 10 mV/1 Ω . Jest ona wprost proporcjonalna do wartości prądu I źródeł prądowych. Odbywa to się jednak kosztem za-



Rys. 9. Nieliniowość napięć U_{AB} i U_{CD} z rys. 8

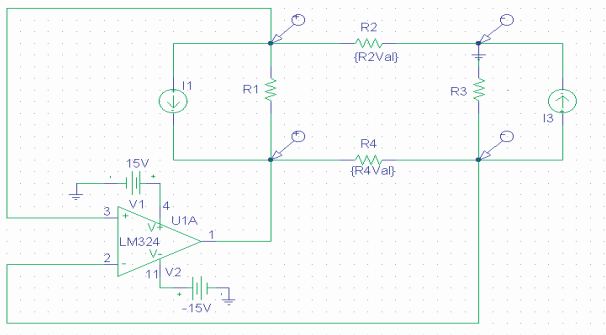
wężenia zakresu pomiarowego ΔR . Przy większym prądzie I wzmacniacz szybciej wchodzi w stan nasycenia. Zakres pomiarowy zależy także od wartości napięcia zasilania wzmacniacza operacyjnego $\pm U_z$. Dla podanych w tabeli 1 zakresów pomiarowych napięcie zasilania wzmacniacza powinno wynosić co najmniej ± 11 V. W tabeli zamieszczono parametry trzech wariantów mostka o różnych prądach zasilających I , zakresach pomiarowych ΔR i odpowiadających im czułościach $\Delta U_{AB}/\Delta R$ oraz jednakowej zmianie napięcia na wyjściu ΔU_{AB} .

Podsumowanie

Układy mostków zasilanych dwuprądowo z rys. 2 i 5 dają możliwość pomiaru wartości jednej lub dwóch rezystancji. Do pomiaru jednej rezystancji (mostek odchyłowy) lepszy jest układ z rys. 5, gdzie R_3 jest rezystancją mierzoną. Układy te umożliwiają także pomiary dwóch

Tabela 1. Parametry i wybrane właściwości metrologiczne mostka z rys. 10

nr	I	$\pm U_z$	n ($R_1 = R_3$)	ΔU_{AB}	ΔR (R_{4max}, R_{2max})	$\Delta U_{AB}/\Delta R$
	mA	V	(Ω)	(V)	(Ω)	(mV/ Ω)
1	1	≥ 11	10 (100k)	10	10k (10k)	1
2	10	≥ 11	10 (10k)	10	1k (1k)	10
3	100	≥ 11	10 (1k)	10	100 (100)	100



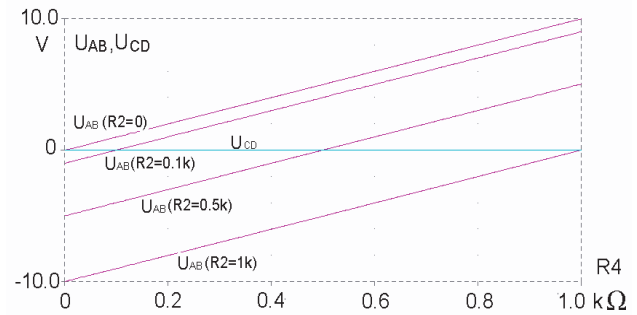
Rys. 10. Układ ze sprzężeniem zwrotnym do pomiaru różnicy rezystancji R_2 i R_4

rezystancji, jednakże ich niedogodnością jest zmienna czułość zależna od mierzonych rezystancji.

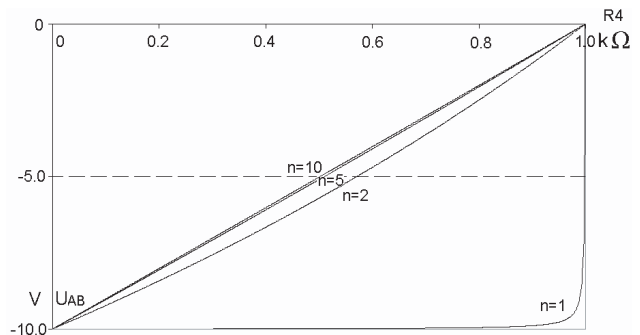
Układ z rys. 10 umożliwia pomiar różnicy dwóch rezystancji. Ma dobrą liniowość i wysoką czułość w szerokim zakresie pomiarowym (tab. 1). W kolejnym etapie badań powyższe wyniki symulacji zostaną zweryfikowane w rzeczywistych układach mostkowych.

Bibliografia

- [1] Anderson K. F.: *The Anderson Loop: NASA's Successor to the Wheatstone Bridge*, artykuł ze strony internetowej: <http://www.vm-usa.com>
- [2] *Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning*, materiały firmy Analog Devices.
- [3] Studziński P.: *Wybrane aspekty pracy przetworników analogowo-cyfrowych sigma-delta w torach pomiarowych*, Materiały Konferencji: SP 2000 Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra, 2000, s. 217-224.
- [4] Warsza Z. L.: *Antymostki – nowy rodzaj układów do pomiaru impedancji*, Materiały Konferencji: SP 2000 Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra, 2000, s. 233-240.
- [5] Warsza Z. L.: *Analiza czułości mostków rezystancyjnych dwuprządowo zasilanych*, Pomiary Automatyka Kontrola, 7-8/2002, s. 109-112.



Rys. 11. Zmiana napięcia U_{AB} dla różnych wartości rezystancji R_4 ($R_4 = R_2$) lub różnicy $\Delta R = R_4 - R_2$, gdy $R_2 \leq R_4$



Rys. 12. Wpływ wartości n na liniowość napięcia wyjściowego

- [6] Warsza Z. L.: *Bridges supplied by two current sources – new tool for impedance measurements and signal conditioning*, Proc. of IMEKO-TC 7 Symposium, Kraków 2002, s. 231-236.
- [7] Warsza Z. L.: *Pomiary wieloparametrowe mostkami o różnym prądowym zasilaniu*, Pomiary Automatyka Robotyka 7-8/2003 (cz. 1.) s. 5-11 i 9/2003 (cz. 2.) s. 21-25.
- [8] Warsza Z. L., *Dwuprządowe mostki prądu stałego*, Pomiary Automatyka Kontrola wkładka Metrologia Technika Pomiarowa, cz.1 Układy zrównoważone... 4/2003 s. I – IV, cz.2 Układy niezrównoważone...12/2003 s. I – IV.
- [9] Król A., Moczko J.: *PSpice – Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych*, NAKOM 2000.

Pracę wykonano w ramach projektu S/WE/3/03 – „Modele numeryczne i analityczne elektrotechniki i ich weryfikacja eksperymentalna”.

Autorzy pragną na zakończenie podziękować doc. Z. Warszy za uwagi do wersji roboczej tej pracy i sugestie dotyczące dalszych działań.