

Układ aktywnego mostka zrównoważonego

Streszczenie. Artykuł przedstawia oryginalny układ mostka rezystancyjnego zrównoważonego za pomocą elementu aktywnego, którego rezystancja jest włączana w jedno z jego ramion. Cechą zmienną tego układu jest występowanie prądu, który można mierzyć nie obciążając mostka. W podanym równaniu równowagi iloraz iloczynów rezystancji naprzeciwległych ramion mostka jest równy ilorazowi czasów, który może być w prosty sposób digitalizowany.

Abstract. The paper presents the original active balanced bridge circuit which can be balanced by means of an active element, whose resistance is incorporated into one of the bridge branches. The characteristic feature of the active balanced bridge (AMZ) is the presence of a measuring-accessible current which can be measured without loading the bridge. In the provided balance equation the quotient of products of the opposite bridge arms resistances equals the quotient of time-intervals which can be easily digitalized. (**An active balanced bridge**).

Słowa kluczowe: mostek zrównoważony, precyzyjne pomiary rezystancji, cyfrowe pomiary rezystancji.

Keywords: balanced bridge, precise resistance measurements, digital resistance measurements.

doi:10.12915/pe.2014.08.54

Wstęp

Celem pracy jest prezentacja oryginalnego układu zrównoważonego mostka rezystancyjnego oraz sposobu wykorzystania go w pomiarach – w nowoczesnych, zwłaszcza przenośnych i zminiaturyzowanych urządzeniach pomiarowych.

Nowością podaną w pracy jest sposób równoważenia mostka rezystancyjnego za pomocą elementu aktywnego, którego rezystancja jest włączana w jedno z ramion mostka oraz układ realizujący ten sposób, który nazwano aktywnym mostkiem zrównoważonym (AMZ). Nowością jest także uogólnione równanie równowagi mostka rezystancyjnego zasilanego prądem stałym.

Na bazie AMZ można budować analogowe lub analogowo-cyfrowe przetworniki pomiarowe rezystancji lub relacji między rezystancjami. Mogą to być np. przetworniki zmian (przyrostu) rezystancji, względnych zmian rezystancji lub ilorazu rezystancji (np. przekładni napięciowej dzielnika rezystancyjnego). AMZ mogą być wykorzystane także do dokładnego pomiaru wielkości nieelektrycznych takich jak: temperatura, ciśnienie, siła, masa, naprężenia, wilgotność, przepływ, a także energia (np. ciepło).

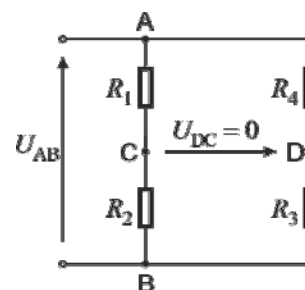
W środowisku metrologów są dobrze znane liczne zalety wynikające z możliwości zastosowania mostka zrównoważonego do pomiarów rezystancji. Od ponad stu lat mostki zrównoważone, wielodekadowe równoważone ręcznie lub automatycznie, były stosowane do najdokładniejszych pomiarów. Jednak wraz z rozwojem cyfrowej techniki pomiarowej ich przydatność zmalała. Brak sygnału wyjściowego nie pozwala na połączenie (w znany i powszechnie stosowany w technice cyfrowej sposób) mostka zrównoważonego z przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Układy AMZ posiadają znane właściwości mostka zrównoważonego, a dodatkowo umożliwiają uzyskanie wyniku pomiaru w postaci cyfrowej, bez potrzeby dołączania przetwornika analogowo-cyfrowego. Ponadto mają wiele nowych korzystnych właściwości metrologicznych.

Autor pracy od wielu lat zajmuje się konstruowaniem przyrządów pomiarowych, w których wykorzystuje oryginalne [1-14] analogowo-cyfrowe przetworniki pomiarowe rezystancji posiadające właściwości mostków zrównoważonych. W pracy [15] przedstawił te układy jako nową klasę układów mostkowych. Odkrycie AMZ [16] ułatwia przejrzyste opracowanie podstaw teoretycznych działania rezystancyjnych mostków zrównoważonych, opisanych bardziej ogólnym równaniem, niż znany warunek równowagi mostka Wheatstone'a.

W pierwszym rozdziale przedmiot pracy przedstawiono na tle podobnych rozwiązań znanych z literatury, podano motywy opracowania takiego rozwiązania oraz wskazano jakie wady ono powinno eliminować i jakie zalety posiadać. W drugim rozdziale opisano konstrukcję i zasadę działania AMZ. Trzeci rozdział opisuje podstawową przełączaną strukturę AMZ oraz wykorzystanie tej struktury w pomiarach. W czwartym rozdziale wymieniono najistotniejsze właściwości podstawowego przełączanego układu AMZ oraz podano wyniki wzorcowania miernika skonstruowanego w oparciu o analizowany układ. W podsumowaniu zawarto informacje o tym, w jaki sposób w pracy wykazano przydatność AMZ w nowoczesnej metrologii. Zwrócono uwagę na ograniczony zakres przeprowadzonych analiz. Wymieniono istotne właściwości AMZ, których nie opisano w tej pracy. Wskazano na potrzebę dalszego rozwoju AMZ i dalszego opracowania podstaw teoretycznych.

Wprowadzenie

Przedmiotem artykułu jest prezentacja i opis konstrukcji AMZ oraz wyjaśnienie jego zasady działania. Podano zależność wiążącą wartość dostępnego pomiarowo prądu płynącego przez rezystancję dołączanego elementu aktywnego z pozostałymi rezystancjami włączonymi w ramiona mostka. Następnie opisano strukturę przełączaną AMZ oraz podano uogólniony warunek równowagi mostka rezystancyjnego, który w szczególnym przypadku sprowadza się do równania równowagi mostka Wheatstone'a.



Rys.1. Schemat zrównoważonego mostka Wheatstone'a z przyjętymi oznaczeniami

Opracowany przez Christie'go w 1833 roku, powszechnie znany czteroramienny mostek rezystancyjny (rys. 1) jest zrównoważony, gdy iloraz iloczynów rezystancji naprzeciwległych ramion tego mostka jest stały i równy 1 (1)

$$(1) \quad \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_4} = 1.$$

W znanych aplikacjach zrównoważonego mostka Wheatstone'a nie występuje dostępny pomiarowo sygnał (prądowy bądź napięciowy), który można by wykorzystać do dalszego przetwarzania np. w przetworniku analogowo-cyfrowym. Układ ten nie jest stosowany w miniaturowych przetwornikach pomiarowych, a zwłaszcza w przetwornikach z cyfrową ekspozycją wyniku. W mostku Wheatstone'a digitalizację wyniku pomiaru uzyskiwano przez odczyt wartości ustawionej (najczęściej ręcznie) na oporniku wielodekadowym włączonym w ramieniu mostka. Opracowywane i stosowane przez autora (począwszy od 1987 roku [1]) mostkowe przetworniki [17] wyróżniają się tym, że dają wynik pomiaru w postaci cyfrowej i bardzo dobrze nadają się do miniaturyzacji, a przy tym zachowują właściwości mostków zrównoważonych.

Pierwszy mostkowy przetwornik rezystancji autor opracował poszukując niedrogiego, a zarazem precyzyjnego przetwornika do pomiaru rezystancji termorezystora, projektując cyfrowy termometr [8]. Korzystne właściwości tego układu, potwierdzone przez badania gotowego produktu w niezależnych laboratoriach oraz wielu znanych i uznanych użytkowników, stały się przyczyną do dalszych poszukiwań. Prace badawcze zakończono sukcesem w postaci układu mostka z tensometrami, w którym cyfrowy wynik jest wprost proporcjonalny do względnej zmiany rezystancji tensometrów. W układzie tym, względne zmiany rezystancji tensometrów są porównywane z wzorcem w postaci ilorazu czasów. Odkrywanie kolejnych właściwości było motywem do dalszych poszukiwań oraz podjęcia pracy prowadzącej do weryfikacji naukowej [15] tych układów. Zdefiniowanie AMZ [16] pozwoliło wskazać występowanie, dostępnego pomiarowo, prądu płynącego przez ramię mostka zrównoważonego i stało się motywem do podjęcia prac prowadzących do opracowania i publikacji podstaw teoretycznych tych układów.

Układy AMZ eliminują istotną wadę w stosunku do zrównoważonego mostka rezystancyjnego Wheatstone'a – brak możliwości wykorzystania w przetwornikach cyfrowych. Eliminują również wady układów z przetwornikami analogowo-cyfrowymi. Zastępując dwa etapy przetwarzania (R/U oraz a/c) jednym, niezależniają pomiar od wpływu niedoskonałości elementów, które w AMZ nie są potrzebne (rezystory, wzmacniacze).

AMZ posiadają wiele zalet, widocznych zwłaszcza w przypadku pomiaru małych zmian rezystancji lub bardzo małych względnych zmian rezystancji. Charakteryzują się dużą czułością bez potrzeby stosowania precyzyjnego wzmacniacza pomiarowego. Wzorcem dla pomiaru ilorazu rezystancji jest iloraz czasów, łatwy do uzyskania z dużą dokładnością. Ponadto w AMZ, można uzyskiwać wiele nowych korzystnych właściwości metrologicznych, np. zrównoważenie, z zasady niezrównoważonego, mostka z tensometrami.

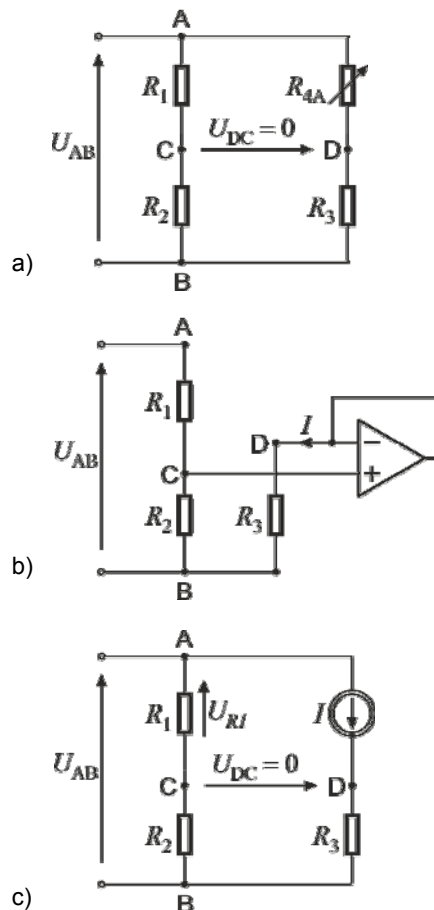
Mostek równoważony rezystancją elementu aktywnego

Działanie układu AMZ przeanalizowano na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 2. Do jednego z ramion mostka Wheatstone'a (rys. 2a) dołączono element aktywny sterowany sygnałem przekątnej pomiarowej mostka (CD), w ten sposób, że rezystancja (R_{4A}) tego ramienia (dalej nazywana rezystancją aktywną) zawsze przyjmuje wartość spełniającą warunek równowagi (2) mostka

$$(2) \quad R_{4A} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$

Funkcje elementu aktywnego może spełniać wzmacniacz różnicowy (rys. 2b) w układzie wtórnik napięciowego. Mostek taki jest zawsze zrównoważony o ile wydajność prądowa wzmacniacza nie jest przekroczona. Przez rezystancję aktywną R_{4A} płynie prąd I o wartości określonej równaniem (3):

$$(3) \quad I = \frac{U_{R1}}{R_{4A}} = \frac{R_2}{R_3} \cdot \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2}.$$



Rys.2. Aktywny mostek zrównoważony: a) schemat ogólny, b) realizacja z użyciem wzmacniacza operacyjnego, c) schemat zastępczy

Na rysunku 3 przedstawiono sytuację, gdy równolegle z rezystancją aktywną R_{4A} włączono rezystor R_4 (rys. 3a) spełniający zależność (4):

$$(4) \quad \frac{R_4}{R_3} > \frac{R_1}{R_2}.$$

Wtedy rezystancja zastępcza ramienia AD (5):

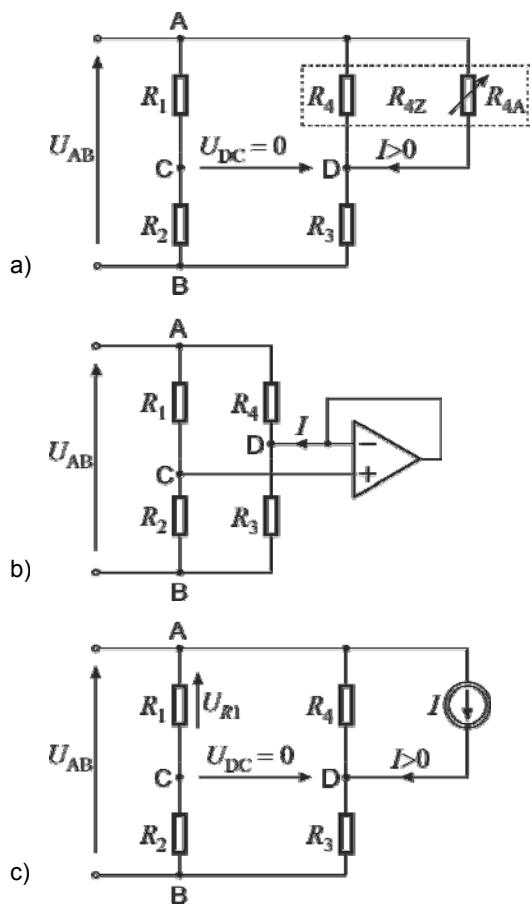
$$(5) \quad R_{4Z} = \frac{R_4 \cdot R_{4A}}{R_4 + R_{4A}}$$

spełnia warunek równowagi mostka. Rezystancja aktywna R_{4A} przyjmuje wartość (6):

$$(6) \quad R_{4A} = \frac{R_1 R_3 R_4}{R_2 R_4 - R_1 R_3}.$$

Przez rezystancję aktywną R_{4A} płynie prąd $I > 0$ o wartości określonej równaniem (7):

$$(7) \quad I = \frac{U_{R1}}{R_{4A}} = \left(\frac{R_2}{R_3} - \frac{R_1}{R_4} \right) \cdot \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2}.$$



Rys.3. Struktura AMZ z rezystorem R_4 : a) rezystancje ramion dla $\frac{R_4}{R_3} > \frac{R_1}{R_2}$, b) realizacja z użyciem wzmacniacza operacyjnego, c) schemat zastępczy

Na podstawie rysunku 4 przeanalizowano sytuację, gdy pomiędzy rezystancjami R_1, R_2, R_3, R_4 zachodzi relacja odwrotna do (4), czyli (8):

$$(8) \quad \frac{R_4}{R_3} < \frac{R_1}{R_2}.$$

Wtedy równoważenie mostka (rys. 4a) jest realizowane przez równoległe dołączenie rezystancji aktywnej R_{3A} do rezystancji R_3 . Zapewnia to ten sam układ ze wzmacniaczem operacyjnym (rys. 3b). Rezystancja zastępcza ramienia DB (9):

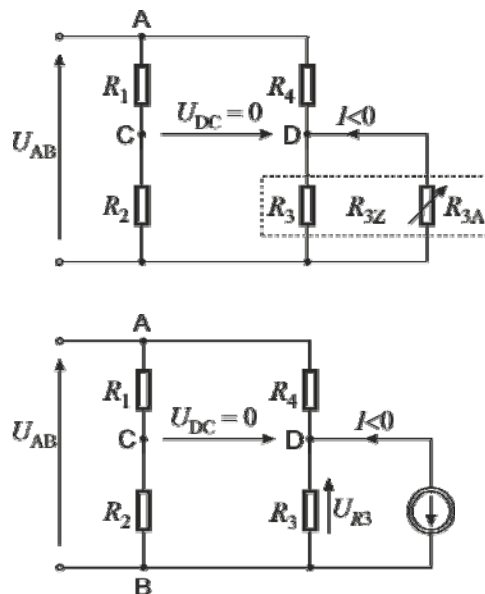
$$(9) \quad R_{3Z} = \frac{R_3 \cdot R_{3A}}{R_3 + R_{3A}}$$

spełnia warunek równowagi mostka. Rezystancja aktywna R_{3A} przyjmuje wartość (10):

$$(10) \quad R_{3A} = \frac{R_2 R_3 R_4}{R_1 R_3 - R_2 R_4}.$$

Przez rezystancję aktywną R_{3A} płynie prąd $I < 0$ o wartości określonej równaniem (11):

$$(11) \quad I = \frac{U_{R3}}{R_{3A}} = \left(\frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3} \right) \cdot \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2}.$$



Rys.4. Struktura AMZ dla $\frac{R_4}{R_3} < \frac{R_1}{R_2}$: a) rezystancje ramion, b) schemat zastępczy

Podobnie jak to pokazano dla ramienia AD (rys. 2), także w ramieniu DB może występować tylko rezystancja aktywna R_{3A} ($R_3 = \infty$). Wtedy równania (10) i (11) upraszczają się do (12) i (13):

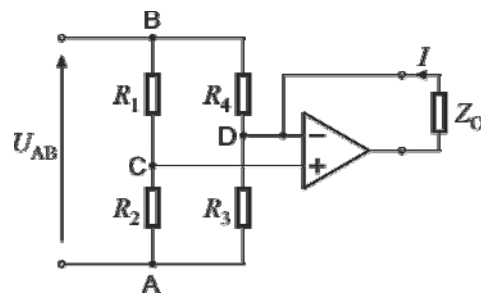
$$(12) \quad R_{3A} = \frac{R_2 R_4}{R_1},$$

$$(13) \quad I = \frac{R_1}{R_4} \cdot \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2}.$$

W sytuacji szczególnej, gdy rezystancje R_1, R_2, R_3, R_4 spełniają warunek równowagi (1) rezystancje aktywne nie są dołączane do ramion mostka. Wzmacniacz operacyjny w układzie wtórnika napięciowego (rys. 3b) nie wpływa na pracę układu. Rezystancje aktywne przyjmują wartości równe nieskończoności ($R_{3A} = R_{4A} = \infty$), prąd $I=0$.

Opisany układ mostka automatycznie równoważonego przez dostrajanie rezystancji elementu aktywnego dołączanego do jednego z jego ramion nazwano mostkiem zrównoważonym.

Cechą znaną AMZ jest występowanie dostępnego pomiarowo prądu, który można mierzyć nie obciążając mostka.



Rys.5. Realizacja AMZ z zaznaczonym miejscem pomiaru prądu I ; Z_0 – impedancja wejściowa układu pomiarowego

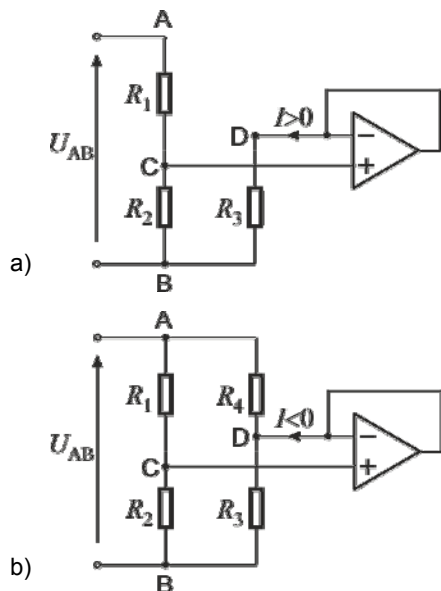
Układ AMZ zrealizowany z użyciem wzmacniacza operacyjnego pozwala w łatwy sposób zmierzyć prąd I , który w zależności od konfiguracji układu jest określony równaniami (3) lub (7) lub (11) lub (13). Na rys. 5 pokazano miejsce włączenia układu pomiarowego o impedancji

wejściowej Z_0 . Mierząc prąd I amperomierzem (wtedy $Z_0 = R_0$) należy tak dobrać jego rezystancję wejściową R_0 , żeby spadek napięcia na tej rezystancji nie przekroczył wartości dopuszczalnych dla liniowej pracy wzmacniacza operacyjnego. Przy zachowaniu tego warunku układ mierzący prąd I nie obciąża mostka: nie wpływa na wartość prądu I , ani na zrównoważenie AMZ.

Przy spełnieniu określonych warunków, prąd I można również mierzyć układem o wejściu pojemnościowym ($Z_0 = C$). Taką sytuację opisano w następnym rozdziale.

Aktywny mostek zrównoważony o przełączanej strukturze

W wielu przyrządach pomiarowych zastosowano AMZ o przełączanej strukturze. Podstawowy układ AMZ z jednym przełącznikiem pokazano na rysunku 7. Konstrukcja tego układu pozwala na uzyskanie dwu różnych konfiguracji AMZ. Konfiguracje te różnią się polaryzacją prądu I płynącego przez dołączaną rezystancję aktywną. Przy odłączonej rezystancji R_4 (rys. 6a, konfiguracja oznaczona indeksem „o”) prąd $I = I_0 > 0$. Przy dołączonej rezystancji R_4 (rys. 6b, konfiguracja „z”) prąd $I = -I_z < 0$.



Rys.6. Dwie konfiguracje AMZ różniące się polaryzacją prądu płynącego przez rezystancję aktywną: a) z odłączonym rezystorem

R_4 , b) z dołączonym rezystorem R_4 ($\frac{R_1}{R_2} > \frac{R_4}{R_3}$)

W układzie z odłączoną rezystancją R_4 (rys. 6a) przez okres czasu t_0 prąd $I = I_0 > 0$ niesie ładunek Q_0 (14)

$$(14) \quad Q_0 = I_0 \cdot t_0.$$

Przy dołączonej rezystancji R_4 (rys. 6b) przez okres czasu t_z prąd $I = -I_z < 0$ niesie ładunek Q_z (15)

$$(15) \quad Q_z = I_z \cdot t_z.$$

Działanie układu przełączanego AMZ polega na cyklicznym przełączaniu pomiędzy tymi dwiema konfiguracjami AMZ w taki sposób, że w każdej z dwu faz cyklu przez dołączoną rezystancję aktywną przepływa ładunek o takiej samej wartości:

$$(16) \quad Q_0 = Q_z.$$

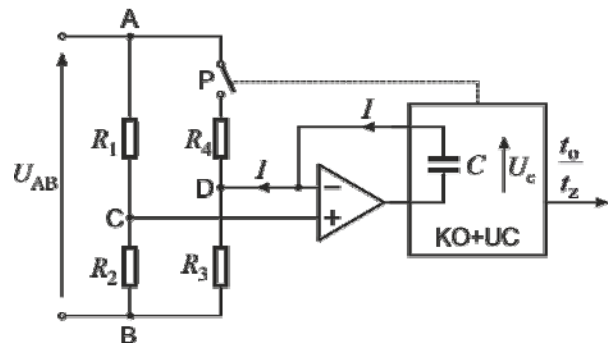
Takie sterowanie układem pozwala wykorzystać kondensator do odmierzania jednakowych porcji ładunku.

Kondensator C jest włączony szeregowo z rezystancją aktywną (rys. 7), przez którą płynie prąd I . Podczas gdy przełącznik P jest otwarty, przez czas t_0 prąd $I = I_0 > 0$ dostarcza do kondensatora C ładunek Q_0 . Przy zamkniętym przełączniku P , przez czas t_z prąd $I = -I_z < 0$ rozładowuje kondensator C ładunkiem Q_z .

Odmierzanie jednakowych porcji ładunku odbywa się przez detekcję jednakowej wartości napięcia U_c na kondensatorze. Komparator wykrywający jednakowe porcje ładunku włączony jest na wejściu układu sterującego przełącznikiem (KO+UC, rys. 7).

Z równości ładunków (16) wynika (17):

$$(17) \quad \frac{t_0}{t_z} = \frac{I_z}{I_0} = \left(\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_4} - 1 \right) \cdot \frac{U_{ABz}}{U_{ABo}}.$$



Rys.7. AMZ z jednym przełącznikiem umożliwiającym odłączenie i dołączenie rezystancji R_4

Gdy napięcie zasilania ma jednakową wartość podczas obu faz pomiaru ($U_{ABz} = U_{ABo}$), wtedy w równaniu mostka napięcie redukuje się. Równanie (17) zapisuje się w postaci (18):

$$(18) \quad \frac{t_0}{t_z} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_4} - 1$$

lub (19)

$$(19) \quad \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3} = \frac{t_z}{t_x},$$

gdzie: $t_x = t_0 + t_z$ jest czasem cyklu pomiarowego.

Oznacza to, że przełączany AMZ jest niezależny od wartości napięcia. Zależność (19) jest równaniem równowagi przeanalizowanego przełączanego AMZ z jednym przełącznikiem.

Pomiar rezystancji przełączanym AMZ polega na wyznaczeniu ilorazu czasów t_z/t_x . Można to zrobić np. mierząc czas cyklu pomiarowego t_x przy zadanym czasie t_z .

Możliwe jest także takie sterowanie układami przełączanymi AMZ, żeby ładunki każdej z dwu faz cyklu były sumowane, dla wielu kolejno po sobie następujących cykli. Wtedy suma ładunku pierwszej fazy, dla wielu cykli, jest równa sumie ładunku drugiej fazy, dla tych samych cykli. Wtedy, zamiast czasu pojedynczego cyklu t_x można mierzyć częstotliwość przełączania przełącznika $f_x = 1/t_x$. W takim przypadku, czas pomiaru T musi obejmować wiele cykli o czasach t_x .

Przy odpowiednim zsynchronizowaniu, sygnału sterującego przełącznikiem z czasem pomiaru trwającym wiele cykli, warunek równowagi (19) przyjmuje postać (20).

$$(20) \quad \frac{N_x}{k} = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3},$$

W równaniu tym, N_x jest liczbą załączeń klucza na określony czas t_z , w określonym czasie pomiaru T . k jest liczbą dokładną, zaprogramowaną w układzie cyfrowym. Iloraz liczb N_x / k jest równy ilorazowi: sumy czasów załączenia klucza w czasie pomiaru T , do całkowitego czasu pomiaru T .

Z przeprowadzonych analiz wynika, że przełączane struktury AMZ mają właściwości mostków zrównoważonych. Przy tym mają sygnał wyjściowy będący funkcją rezystancji ramion mostka (19). Ponadto ten sygnał wyjściowy może mieć postać cyfrową (20), bez dołączania przetwornika analogowo-cyfrowego.

Właściwości AMZ

Właściwości metrologiczne AMZ, przeanalizowano porównując równanie równowagi (19) przełączanego AMZ, z równaniem równowagi mostka Wheatstone'a (1).

Jednakowo w obu równaniach, iloraz iloczynów rezystancji naprzeciwległych ramion mostka (IIRNRM):

- jest stały
- nie jest zależny od napięcia zasilania mostka.

Te dwie cechy, podsumowują powszechnie znane korzystne właściwości metrologiczne mostków zrównoważonych prądu stałego.

Równania (1) i (19) różnią się wyrażeniami stojącymi po prawej stronie.

- w zrównoważonym mostku Wheatstone'a - IIRNRM musi być równy 1,

- w przełączanym AMZ - IIRNRM jest równy ilorazowi czasów.

Oznacza to, że mostek Wheatstone'a można zrównoważyć wyłącznie przez dostrojenie rezystancji ramion. Przełączany AMZ jest zrównoważony dla różnych rezystancji ramion. To równoważenie odbywa się automatycznie, przez dostrojenie ilorazu czasów. Stąd wynika wiele oryginalnych właściwości oraz możliwości zastosowania AMZ.

Podstawowe właściwości AMZ, opisano na przykładzie mostka z jednym przełącznikiem (rys. 7) o równaniu równowagi (20).

W mostku takim:

- charakterystyka statyczna opisana jest równaniem (21):

$$(21) \quad N_x = k \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3}.$$

- wielkość wyjściowa N_x (liczba impulsów załączających przełącznik na zadany czas t_z w czasie pomiaru $T = k \cdot t_z$):

- jest funkcją wyłącznie rezystancji ramion mostka,
- nie jest zależna od wartości napięcia zasilania układu, ani od wartości jakichkolwiek innych napięć odniesienia,
- nie jest zależna od częstotliwości generatora, wyznaczającego czas załączenia przełącznika oraz czas pomiaru,
- jest w postaci cyfrowej.

- liczba k (dokładna) jest parametrem programowanym w układzie cyfrowym.

Mostek ten umożliwia:

- bezpośrednie porównanie, stosunku rezystancji ze stosunkiem czasów (19), bez dodatkowego przetwarzania. Jest to najprostszy układ bezpośredniego porównania, stosunku rezystancji ze stosunkiem czasów,
- bezpośrednie wskazanie wartości rezystancji, konduktancji lub stosunku rezystancji (lub konduktancji),

- bezpośrednie porównanie dwu dzielników rezystancyjnych o różnych przekładniach:

$$(22) \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{k}{N_x} \frac{R_4}{R_3},$$

porównywane stosunki rezystancji lub konduktancji nie muszą być nominalnie jednakowe, ale mogą się różnić np. o rząd. Daje to możliwość bezpośredniego porównania, dwu różnych stosunków rezystancji, z rozdzielczością wynikającą z doboru liczb N_x oraz k .

Analizowany układ AMZ o charakterystyce statycznej określonej równaniem (21), wykorzystano m.in. do skonstruowania miernika małych rezystancji. Oczekiwano uzyskania następujących parametrów metrologicznych:

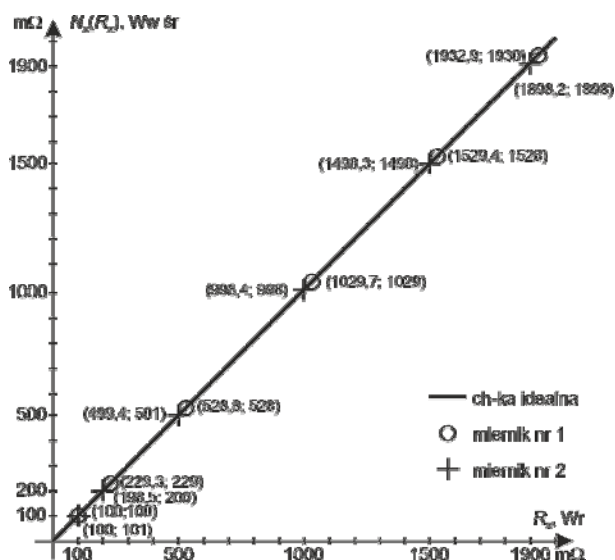
- zakres pomiarowy: 0 - 2000 mΩ
- rozdzielczość 1 mΩ
- prąd pomiarowy 5 mA
- dokładność 0,1 % w.m. ± 1 cyfra.

Tabela 1. Wyniki wzorcowania. Miernik nr 1. Wn – wartość nominalna, Ww śr – wskazanie wzorcowanego przyrządu średnie, Wr – wartość poprawna, U – niepewność pomiaru

L.p.	Wn [mΩ]	Ww śr [mΩ]	Wr [mΩ]	Ww śr-Wr [mΩ]	U [mΩ]
1	100	100	100,0	0,0	0,6
2	200	229	229,3	-0,3	0,6
3	500	528	528,8	-0,8	0,7
4	1000	1029	1029,7	-0,7	0,8
5	1500	1528	1529,4	-1,4	0,9
6	1900	1930	1932,9	-2,9	0,9

Tabela 2. Wyniki wzorcowania. Miernik nr 2.

L.p.	Wn [mΩ]	Ww śr [mΩ]	Wr [mΩ]	Ww śr-Wr [mΩ]	U [mΩ]
1	100	101	100,0	1,0	0,9
2	200	200	198,5	1,5	0,7
3	500	501	499,4	1,6	0,7
4	1000	998	998,4	-0,4	0,8
5	1500	1498	1498,3	-0,3	0,9
6	1900	1898	1898,2	-0,2	0,9



Rys.8. Charakterystyka idealna cyfrowego miernika małych rezystancji z zaznaczonymi punktami wzorcowania dwóch mierników

Układ zrealizowano w mostku (rys. 7) zasilanym napięciem $U_{AB} = 5V$. Rezystor mierzony włączono w ramię CB ($R_x = R_2$). Prąd pomiarowy płynący przez rezystor

mierzony ustalono przyjmując wartość rezystora $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$. W tej sytuacji równanie (21) przyjmuje postać (23):

$$(23) \quad N_x = 10^{-3} k \frac{R_4}{R_1} R_x,$$

Wartości rezystorów R_1 i R_4 oraz liczbę k dobrano tak, że równanie (23) przyjęło postać (24):

$$(24) \quad N_x = R_x.$$

Tak skonstruowane dwa mierniki poddano badaniom w laboratorium wzorcującym, akredytowanym przez PCA. W tabelach 1 i 2 zamieszczono wyniki przeprowadzonego wzorcowania. Na rys. 8, zaznaczono wyniki wzorcowania, na tle charakterystyki idealnej projektowanego miernika.

Z analizy uzyskanych danych wynika, że charakterystyki badanych urządzeń spełniają zdefiniowane wcześniej oczekiwania. Charakterystyka jest liniowa. Błędy mieszczą się w założonym przedziale.

Podsumowanie

W pracy przeanalizowano oryginalny, zgłoszony do ochrony patentowej [16] układ aktywnego mostka zrównoważonego. Pokazano, że jest to mostek, który jest zrównoważony także wtedy, gdy wartości rezystorów włączonych w jego ramiona nie spełniają warunku równowagi mostka Wheatstone'a. Podkreślono cechę znamioną tego układu – dostępność pomiarową prądu płynącego w ramieniu mostka. Wskazano możliwości pomiaru tego prądu w taki sposób, że impedancja wejściowa układu mierzącego nie zakłóca go i nie obciąża mostka. Opisano podstawowy układ przełączanego aktywnego mostka zrównoważonego, w którym do pomiaru prądu w ramieniu mostka wykorzystano kondensator. Wyprowadzono równanie równowagi podstawowego przełączanego AMZ. Równanie to w szczególnym przypadku sprowadza się do równania równowagi mostka Wheatstone'a. Analizując to równanie wymieniono wiele nowych, korzystnych właściwości metrologicznych, które umożliwiają szerokie wykorzystanie mostka zrównoważonego we współczesnej, zwłaszcza cyfrowej technice pomiarowej. Zamieszczono wyniki wzorcowania cyfrowego miernika małych rezystancji, skonstruowanego w oparciu o analizowany układ przełączanego AMZ.

W pracy nie zamieszczono opisu, wspomnianych we wstępie, układów AMZ umożliwiających bezpośredni pomiar przyrostów rezystancji, względnych zmian rezystancji, przekładni napięciowej dzielnika rezystancyjnego. Nie wspomniano o możliwości budowania, układów przełączanych z więcej niż jednym przełącznikiem. Tematy te i inne pozostają do uwzględnienia w dalszych badaniach i kolejnych opracowaniach.

Mostki, o warunku równowagi bardziej ogólnym niż znany warunek równowagi mostka Wheatstone'a, nie są opisywane w literaturze. Teoretyczne podstawy działania

tych układów, nie zostały jeszcze opracowane. Autor ma nadzieję, że w tej pracy udało mu się, w miarę przejrzystość i zrozumiale, poczynić pierwszy mały krok w kierunku opracowania tych podstaw.

LITERATURA

- [1] Tync B., Sposób pomiaru rezystancji i układ do pomiaru rezystancji, *Opis patentowy*, patent nr 146539 (1987)
- [2] Tync B., Sposób pomiaru zmian rezystancji i układ do pomiaru zmian rezystancji, *Opis patentowy*, patent nr 177467 (1995)
- [3] Tync B., „Mostki tybo”. Istota, możliwości i zastosowanie oryginalnych przetworników analogowo-cyfrowych, *Krajowy Kongres Metrologii*, (2001)
- [4] Tync B., „Mostki tybo” – oryginalne przetworniki analogowo-cyfrowe, *Elektronizacja*, (2002), n.9, 21-23
- [5] Tync B., „Mostki tybo” – ładunkowo zrównoważone układy jako oryginalne przetworniki analogowo-cyfrowe, *Pomiary Automatyka Kontrola*, (2002), n.3, 26-28
- [6] Tync B., „Mostki tybo” – nowa metoda przetwarzania analogowo-cyfrowego, *Konferencja AUROMECON*, Poznań (2002), zbiór referatów, 30-34
- [7] Tync B., „Mostki tybo” – ładunkowo zrównoważone układy jako oryginalne przetworniki analogowo-cyfrowe, *Konferencja: Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle*, Zielona Góra (2002)
- [8] Tync B., Ładunkowo zrównoważony układ mostkowy do pomiaru temperatury, *Konferencja: Podstawowe Problemy Metrologii*, Ustroń (2003), 67-78
- [9] Tync B., Układ do pomiaru temperatury wykorzystujący mostek z termorezystorem zrównoważony ładunkowo, *Praca magisterska*, Gliwice (2004),
- [10] Tync B., Ładunkowo zrównoważony układ mostkowy o dwuprądowym zasilaniu, *Międzyuczelniana Konferencja Metrologów*, Ustroń (2004), 77-84
- [11] Skubis T., Tync B., Cyfrowe pomiary rezystancji mostkami zrównoważonymi, *Międzynarodowe Seminarium Metrologów*, Rzeszów (2004), 159-170
- [12] Skubis T., Tync B., Cyfrowe pomiary rezystancji mostkami zrównoważonymi, *Pomiary Automatyka Kontrola*, (2004), n.12, 5-8
- [13] Tync B., Skubis T., Analogowo-cyfrowe mostki prądu stałego, *Kongres Metrologii - Pomiary Automatyka Kontrola*, 2 (2007), n.9bis, 683-686
- [14] Tync B., Ładunkowo zrównoważony mostek rezystancyjny jako przetwornik analogowo-cyfrowy, *Symposium: Metrologiczne Właściwości Programowanych Przetworników Pomiarowych*, Gliwice (2007)
- [15] Tync B., Analogowo-cyfrowe zrównoważone mostki rezystancyjne, *Rozprawa doktorska*, Gliwice (2007)
- [16] Tync B., Układ aktywnego mostka zrównoważonego oraz sposób i układ pomiarowy z wykorzystaniem aktywnego mostka zrównoważonego, *Opis patentowy – zgłoszenie nr P385003* (2008)
- [17] Chwałeba A., Poniński M., Siedlecki A., *Metrologia Elektryczna*, WNT, wydanie XI zm., Warszawa (2014)

Autor: dr inż. Bolesław Tync, Zakład Elektronicznej Aparatury Pomiarowej TYBO Bolesław Tync, ul. Mikołowska 2/2, 41-400 Mysłowice, E-mail: tync@tybo.pl.