

Zygmunt Lech WARSZA

Politechnika Radomska

Instytut Automatyki i Telematyki Transportu

POMIARY IMPEDANCJI UKŁADAMI MOSTKOWYMI O DWUPRĄDOWYM ZASILANIU

Streszczenie. Podano nowy rodzaj układu pomiarowego powstający przy niekonwencjonalnym zasilaniu mostka impedancyjnego z dwu jednakowych źródeł prądowych. Podano podstawowe wzory na napięcia wyjściowe przekątnych mostka i warunki równowagi – równość iloczynów impedancji w ramionach przyległych. Zaproponowano dla tego typu układów nazwę – antymostek. Omówiono krytycznie właściwości i zarysowano potencjalne obszary zastosowań: układy zrównoważone – w pomiarach laboratoryjnych, układy odchyłowe – w kondycjonowaniu sygnałów z czujników parametrycznych oraz do diagnostyki układów i badań zmian właściwości materiałów. Układy antymostków mogą być realizowane zarówno sprzętowo, jak i częściowo wirtualnie. Łączą one w sobie właściwości układów mostkowych i układów kompensacji prądu. Dają też nowe możliwości metrologiczne w porównaniu do stosowanych dotychczas impedancyjnych układów pomiarowych, np. omówiony w treści równoczesny pomiar dwu wielkości różnie wpływających na rezystancję pary czujników.

IMPEDANCE MEASUREMENT BRIDGE CIRCUITS WITH DOUBLE CURRENT SUPPLY

Summary. The new type of measuring circuits supplied by two current sources is proposed under the name **anti-bridge**. The basic equations as well as the properties and possible fields of applications are discussed. The balanced anti-bridges could be used for laboratory measurements and unbalanced ones as well as those with feedback – for signal conditioning circuits of parameter sensors. The anti-bridges could be made hardware or partially virtual. They associate some properties of classic bridges and current compensation circuits and offer new metrologic possibilities.

1. WSTĘP

Zadania pomiarowe układów składających się z immitancji bywają bardzo zróżnicowane. Mogą one polegać na znalezieniu pojedynczych wartości parametrów opisujących jedną lub szereg gałęzi schematu zastępczego, na znalezieniu ich charakterystyk w funkcji częstotliwości, lub na zbadaniu odpowiedzi na różne wymuszenia w dziedzinie amplitudy i czasu. Bardziej rozbudowane układy mają 4, 5 lub więcej dostępnych zacisków i większą liczbę często połączonych nierozłącznie ze sobą gałęzi, których parametry podlegają mierzeniu. Jeżeli układ nie zawiera źródeł wewnętrznych, to pomiar składowych immitancji jego gałęzi wymaga doprowadzenia odpowiedniego zasilania z zewnątrz. W impedancyjnych układach pomiarowych mierzy się zależności ich parametrów od wielkości zewnętrznych bądź elektrycznych, bądź nieelektrycznych, z których jedna lub kilka stanowią wielkości mierzone, a pozostałe są wielkościami wpływającymi w sposób niepożądany na wyniki pomiarów. Oddziaływanie tych ostatnich należy wyeliminować poprzez korekcję lub kompensację. Jeżeli ich sygnał pomiarowy ma być odpowiednio ukształtowany w celu przekazania dalej torem pomiarowym, to wykonujące tę operację jego początkowe człony funkcjonalne noszą nazwę układu kondycjonowania sygnału.

Dla wielu obiektów pomiarowych np. w diagnostyce układów elektrycznych, przy badaniu zmian własności elektrycznych materiałów oraz dla części układów z czujnikami, nie jest konieczne zmierzenie wartości wszystkich parametrów układu. Wystarczy znaleźć stosunki badanych składowych impedancji odniesione do impedancji wzorcowej lub nawet ich przyrosty od pewnych wartości początkowych, albo też prostą, zazwyczaj liniową kombinację tych przyrostów. Poniżej omawia się nowe rozwiązania impedancyjnych układów pomiarowych na tle dotychczas stosowanych ich rozwiązań.

2. ZARYS STANU TECHNIKI POMIARÓW IMPEDANCJI

Istnieje wiele różnych metod pomiarów składowych impedancji. Najdokładniejsze są metody mostkowe i kompensacyjne. Pomiarowe układy mostkowe pojawiły się wiele lat temu. Pierwszy był mostek czteroramienny symetryczny prądu stałego: idea - Christi 1833, zastosowanie - Wheatstone 1844, modyfikacja - Siemens 1848 [1, 3, 4]. Następnie powstały: w 1862 - mostek Thompsona, w 1865 - mostek Maxwella do pomiarów indukcyjności z galwanometrem balistycznym, i w 1861 - mostek Wiena do pomiarów pojemności, zasilany już po raz pierwszy prądem przemiennym, a później - wiele innych mostków, znanych i powszechnie stosowanych do dziś, w tym mostek Scheringa w 1920. Obecnie używa się układów mostków równoważonych zarówno ręcznie, jak i automatycznie, w tym cyfrowo oraz układów mostków odchyłowych o stabilizowanym zasilaniu. Istnieje na ten temat bardzo bogata literatura, w tym monografie [1-4].

Do pomiarów impedancji stosuje się również układy kompensacyjne zarówno prądu stałego, jak i zmiennego. W ostatnich kilkudziesięciu latach opracowano ponadto różne inne układy analogowe, a następnie układy ze wskazaniem cyfrowym, wykorzystujące dzielniki

indukcyjne, wzmacniacze operacyjne, człony mnożące i dzielące, detektory fazoczułe oraz szybkie przetwarzanie analogowo-cyfrowe, cyfrowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe [5-7]. Przy automatyzacji procesu równoważenia układów prądu zmiennego natrafiono na duże trudności praktyczne.

Zupełnie nowe możliwości w dziedzinie budowy układów pomiarowych stwarza rozwijająca się ostatnio technika budowy tzw. przyrządów wirtualnych, w której część procedur przetwarzania sygnałów układu rzeczywistego (dotąd realizowanego sprzętowo) dokonuje się jako przetwarzanie programowe w systemie mikroprocesorowym. Opracowano m.in. mostek wirtualny do pomiaru składowych RC impedancji [8], którego tylko dwie gałęzie (rezystor wzorcowy i impedancja mierzona) są zrealizowane fizycznie. Napięcie zasilające te gałęzie jest dokładnie syntetyzowane cyfrowo w sposób programowy. Napięcia z tych dwu gałęzi przetwarza się dalej cyfrowo, realizując wirtualnie algorytm równoważenia się mostka prądu zmiennego. Stosując dostępne na rynku przetworniki a/c i układy dsp uzyskano dokładności niewiele gorsze niż dla dokładnych mostków cyfrowych. Te nowe układy są przy tym bardzo szybkie. Otrzymuje się wynik w czasie krótszym od jednego okresu napięcia zasilającego.

Tak więc dzięki nowym, wirtualnym możliwościom realizacji układów dotychczasowa ogromna wiedza o właściwościach metrologicznych różnych układów zrównoważonych, w tym mostków, nabiera ponownie dużego znaczenia. Należy jedynie zweryfikować możliwości jej stosowania w ramach zupełnie nowej metody realizacji zadań pomiarowych. Nawet bardzo rozbudowane algorytmy równoważenia mostków prądu zmiennego można obecnie realizować w wirtualny sposób. Ponadto w wirtualnie tworzonej części układu nie występuje wpływ sprzężeń pasożytniczych. Można też budować układy do równoczesnego pomiaru i identyfikacji parametrów dwójników wieloelementowych i stosować rozwiązania, które były dotychczas zbyt trudne do realizacji czysto fizycznej. Dotyczy to również prezentowanego tu nowego rodzaju układów o dwu źródłach zasilających.

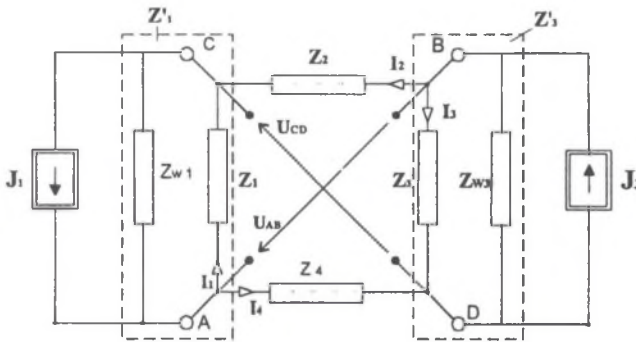
Pomimo dużej różnorodności znanych dotychczas układów do pomiarów impedancji nadal pojawiają się dalsze propozycje ich rozwiązań, w tym nowe układy analogowe, które w odmienny niż dotychczas sposób przetwarzają sygnały pomiarowe. W szczególności dotyczy to układów do tak zwanego kondycjonowania (kształtowania) sygnałów z czujników pomiarowych.

Poniżej omawia się nowy rodzaj układów pomiarowych o niekonwencjonalnym zasilaniu z dwu źródeł prądowych. Układy te autor proponuje nazwać antymostkami ze względu na ich warunki równowagi, odmienne jak dla mostków klasycznych. Możliwość budowy układu o warunku równowagi w postaci równości iloczynu rezystancji w ramionach przyległych mostka autor odkrył podczas opracowywania pracy [9], omawiającej gausmierze hallotronowe. Dwa z tych układów zasygnalizowano następnie w publikacji [10], rekomendowanej przez autora na XII Międzyczucelnianą Naradę Metrologów w 1977 roku. Mimo upływu lat ten oryginalny rodzaj układów pozostawał aż dotąd szerzej niezany, gdyż autor nie publikował ich ze względu na występujące poprzednio trudności realizacyjne. Nie ma ich w obszernej monografii [11] opisującej wieloźródłowe układy kompensacyjne. Antymostki mogą dopiero obecnie nabrać znaczenia praktycznego ze względu na zupełnie

inne możliwości realizacyjne – zarówno sprzętowe, jak i programowe. Układy te mogą służyć do budowy zupełnie nowego rodzaju członów funkcyjnych inteligentnych przetworników i systemów pomiarowych, o innych niż dotychczasowe właściwościach metrologicznych, a w tym do tworzenia nowych układów kondycjonowania sygnałów z czujników parametrycznych. Niniejsza publikacja stanowi rozszerzoną wersję pracy [12], w której autor po raz pierwszy przedstawił obszernie zasady budowy antymostków i ich podstawowe właściwości.

3. ZASADA DZIAŁANIA ANTYMOSTKÓW

W rozważanych poniżej nowych układach pomiarowych, podobnie jak w układach mostkowych i kompensacyjnych, wykorzystuje się łatwo wykrywalny stan układu – równość potencjałów dwu węzłów, zwany stanem równowagi układu. Na rys.1 przedstawiono układ mostka czterogałęziowego zasilany w niekonwencjonalny sposób - z dwu źródeł rzeczywistych o wydajnościach prądowych J_1 , J_3 i impedancjach wewnętrznych Z_{w1} , Z_{w3} . Źródła te, podobnie jak w układzie kompensacji prądów, włączone są względem układu mostkowego w kierunku zgodnym – na wzajemne wspomaganie się.



Rys.1. Podstawowy schemat nowego rodzaju układów pomiarowych nazwanych antymostkami. J_1 , J_3 – wydajności prądowe źródeł zasilających, Z_{w1} , Z_{w3} – ich impedancje wewnętrzne, Z_1, \dots, Z_4 – impedancje gałęzi układu, U_{AB} , U_{CD} – napięcia wyjściowe, $I_1 \dots I_4$ – prądy w gałęziach

Fig. 1. Basic diagram of the new type measurement circuits – antibriges. J_1 , J_2 – current supply sources; Z_{w1} , Z_{w2} – their internal impedances; Z_1, \dots, Z_4 impedances of bridge circuit arms; U_{AB} , U_{CD} – output voltages; I_1, \dots, I_4 – circuit currents

Prądy I_2 , I_4 są sobie równe. Zamieniając źródła prądowe J_1 , J_3 wraz z towarzyszącymi im impedancjami Z'_1 , Z'_3 na równoważne źródła napięciowe i stosując zasadę superpozycji, otrzymuje się następujące wzory na napięcia przekątnych AB i CD:

$$U_{AB} = \frac{J_1 Z'_1 (Z'_3 + Z_4) - J_3 Z'_3 (Z'_1 + Z_2)}{Z'_1 + Z_2 + Z'_3 + Z_4}, \quad (1)$$

$$U_{CD} = \frac{J_3 Z'_3 (Z'_1 + Z_4) - J_1 Z'_1 (Z'_3 + Z_2)}{Z'_1 + Z_2 + Z'_3 + Z_4}, \quad (2)$$

gdzie:

$$Z'_1 = \frac{Z_1 Z_{w1}}{Z_1 + Z_{w1}}, \quad Z'_3 = \frac{Z_3 Z_{w3}}{Z_3 + Z_{w3}},$$

Ze wzorów (1) i (2) wynikają dwa różne warunki równowagi układu. Dla $U_{AB} = 0$ lub $U_{CD} = 0$ odpowiednio otrzymuje się:

$$J_1 Z'_1 (Z'_3 + Z_4) = J_3 Z'_3 (Z'_1 + Z_2), \quad (3)$$

$$J_3 Z'_3 (Z'_1 + Z_4) = J_1 Z'_1 (Z'_3 + Z_2). \quad (4)$$

Warunki te są od siebie niezależne. Każdy z nich może być spełniony przez regulację składowych bądź jednego ze źródeł prądowych, bądź impedancji mostka. Przy zasilaniu układu z dwu źródeł o jednakowych wydajnościach prądowych $J_1 = J_3 = J$ równania (1 – 4) upraszczają się. Otrzymuje się wówczas:

$$U_{AB} = \frac{J (Z'_1 Z_4 - Z'_3 Z_2)}{Z'_1 + Z_2 + Z'_3 + Z_4} \quad (5)$$

i warunek równowagi dla $U_{AB} = 0$:

$$Z'_1 Z_4 = Z'_3 Z_2, \quad (5a)$$

oraz

$$U_{CD} = \frac{J (Z'_3 Z_4 - Z'_1 Z_2)}{Z'_1 + Z_2 + Z'_3 + Z_4} \quad (6)$$

i dla $U_{CD} = 0$

$$Z'_1 Z_2 = Z'_3 Z_4. \quad (6a)$$

Dalsze uproszczenie wzorów (5), (6) na napięcia wyjściowe i warunków równowagi (5a) i (6a) uzyskuje się po zastosowaniu dwu, nie tylko jednakowych, ale i idealnych źródeł prądowych ($|Z_{w1}| \gg |Z_1|$, $|Z_{w3}| \gg |Z_3|$). Otrzymuje się wówczas:

$$U_{AB} = \frac{J(Z_1 Z_4 - Z_3 Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \quad (7)$$

$U_{AB}=0$ występuje, gdy:

$$Z_1 Z_4 = Z_3 Z_2 \quad (7a)$$

oraz:

$$U_{CD} = \frac{J(Z_3 Z_4 - Z_1 Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \quad (8)$$

$U_{CD} = 0$ występuje, gdy:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (8a)$$

Tak więc w obu przypadkach, przy równości źródeł prądowych zasilających układ $J_1=J_3$, warunkiem równowagi jest równość iloczynów impedancji ramion przyległych do przekątnej wyjściowej mostka. Dla układu z rys.1 uzyskuje się równowagę przy równości iloczynów impedancji przyległych do przekątnej AB – wzór (7a) lub też równowagę przy równości iloczynów impedancji przyległych do przekątnej CD – wzór (8a). Warunki te są od siebie niezależne. Mogą one być spełnione równocześnie jedynie dla mostka o wszystkich jednakowych impedancjach. Taką samą parę warunków otrzymuje się przy zasilaniu układu dwoma jednakowymi źródłami J dołączonymi równolegle do ramion mostka Z_2 i Z_4 . Warunki (7a) i (8a) różnią się istotnie od warunku równowagi mostka przy jego klasycznym zasilaniu z jednego źródła, dołączonego do którejś z przekątnych AB lub CD. Wówczas w obu przypadkach otrzymuje się równość iloczynów impedancji w ramionach przeciwnych:

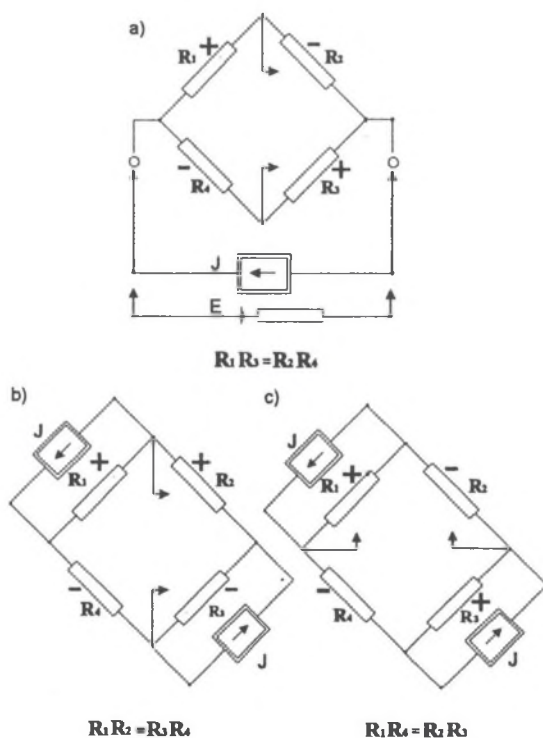
$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (9)$$

Dlatego też, dla podkreślenia tej różnicy, autor zaproponował, by układy mostkowe przy nowym sposobie zasilania, jak pokazano to na rys.1, nazywać - **antymostkami**. Z postaci wzorów (7a) i (8a) wynika też, że dla każdego z dotychczas znanych układów mostkowych jako alternatywę można podać aż 4 różne warianty struktury połączeń impedancji w układzie antymostka: – po 2 dla antymostków o $U_{AB} = 0$ i antymostków o $U_{CD} = 0$. Wynika to z możliwości permutacji, impedancji w jednym z iloczynów dla każdego z nowych warunków równowagi (zamiana miejscami impedancji ramion mostka). Otwiera to ogromne możliwości aplikacyjne antymostków przy ich zasilaniu nie tylko prądem stałym, ale przede wszystkim zmiennym zarówno sinusoidalnym, jak i o innym kształcie. Autor zamierza przeanalizować to szczegółowo w innej publikacji.

4. UKŁADY ANTYMOSTKÓW PRĄDU STAŁEGO (DC)

4.1. Antymostki zrównoważone

Podstawowe układy czteroramiennego mostka rezystancyjnego prądu stałego, przy różnych sposobach zasilania, przedstawiono na rys.2. Układ a – to mostek klasyczny, układy b, c – to antymostki zasilane z dwu jednakowych źródeł prądowych J . Przy prądzie stałym impedancje $Z_1 \dots Z_4$ są odpowiednio równe rezystancjom R_1, \dots, R_4 . Ze wzorów (7a) i (8a) uzyskuje się warunki równowagi podane na rys.2. Jest to równość iloczynów par rezystancji ramion przyległych antymostków w poziomie oraz – w pionie. Tak więc znany warunek równowagi mostka klasycznego i dwa nowe warunki równowagi antymostków b) i c) wyczerpują wszystkie trzy możliwe równości par iloczynów impedancji ramion struktury mostkowej.



Rys.2. Układy czteroramiennego mostka rezystancyjnego przy różnych sposobach zasilania: a) układ klasyczny oraz b) i c) układy antymostka zasilane z dwu jednakowych idealnych źródeł prądowych

Fig. 2. Circuits of 4 - arms resistance bridges with different supply: a) classic Wheatstone bridge; and c) antibridges – supplied from two ideal equal current sources

Z równań (7) i (8) wynika, że antymostki mogą być wykorzystywane bądź jako odchyłowe, bądź jako zrównoważone. W pierwszym z przypadków źródła muszą być stabilizowane, w drugim – jedynie współbieżne. Układy antymostków prądu stałego z rys.2b, 2c mogą więc jako zrównoważone służyć do bezpośredniego pomiaru wartości bądź rezystancji, lub konduktancji jednego z ramion, bądź stosunku, lub iloczynu tych parametrów w dwu ramionach mostka. Ponadto z rys.1 wynika, że podobnie jak w metodzie porównania spadków napięć, czy też w mostku Thompsona, wybraną parę naprzeciwległych rezystorów można dołączać przy użyciu 4 zacisków. Wówczas rezystancje przewodów doprowadzających prąd nie wchodzą w warunek równowagi. Przy pomiarach małych rezystancji omawiane, czterogłęziowe antymostki mogą więc stanowić alternatywę sześciogłęziowego mostka Thompsona lub mostka Warszawskiego [13]. Spełnienie warunku współbieżności dwu źródeł prądowych J obecnie wydaje się nawet łatwiejsze niż warunek upraszczania się równania równowagi mostka Thompsona (równość lub stały stosunek rezystancji dwu ramion i dwu dekad regulacyjnych). Przy niezbyt dużych różnicach wydajności prądowej J obu źródeł można też stosować metodę przeciwstawienia (zamiany źródeł miejscami) i określać wynik jako średnią z dwu pomiarów.

Warunki uzyskania maksymalnej czułości są nieco inne niż dla mostka klasycznego i różne dla każdego z antymostków podanych na rys.2b i 2c. Warunki te nie będą omawiane.

Dla każdego z układów podanych na rys.2 rezystancje początkowe spełniające warunek równowagi można przedstawić jako wielokrotności jednej z nich, np. rezystancji R_1 . Przy dowolnych rezystancjach R_1, R_2, R_4 , lecz jednakowych dla każdego z tych układów rezystancje R_3 spełniające warunki równowagi są różne. Otrzymuje się wówczas czwórki rezystancji podane w poniższej tabeli:

Tabela 1

Porównanie warunków równowagi układów

- układ 2a)	R_1	$R_2 = mR_1$	$R_4 = nR_1$	$R_{3a} = m/n R_1$
- układ 2b)	R_1	$R_2 = mR_1$	$R_4 = nR_1$	$R_{3b} = m/n R_1$
- układ 2c)	R_1	$R_2 = mR_1$	$R_4 = \bar{n}R_1$	$R_{3c} = m/n R_1$

Warunki równowagi układów a) i b) mogą być równocześnie spełnione ($R_{3a} = R_{3b}$) tylko wtedy, gdy $n = 1$, układów a) i c) ($R_{3a} = R_{3c}$), gdy $m = 1$, zaś dla antymostków – układy b) i c) ($R_{3a} = R_{3c}$), gdy $m = n$. Warunki równowagi wszystkich trzech układów mogą być spełnione równocześnie tylko przy $m = n = 1$, a więc gdy wszystkie rezystancje są jednakowe.

4.2. Antymostki odchyłowe

Scharakteryzujemy teraz pokrótce właściwości antymostków niezrównoważonych. Wzory na napięcia wyjściowe rezystancyjnej struktury mostkowej przy różnych, podanych na rys.2, sposobach jej zasilania ze źródeł prądowych J zestawiono poniżej.

Układ a) – klasyczny mostek Wheatstone'a:

$$U'_{CD} = \frac{JR_1 R_3}{\sum R_i + \sum \Delta R_i} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 - \varepsilon_2 \varepsilon_4). \quad (10)$$

gdzie: R_i – rezystancje początkowe spełniające warunek równowagi układu, ΔR_i ; $\varepsilon_i = \Delta R_i / R_i$ – przyrosty bezwzględne i względne tych rezystancji.

Układ b) – antymostek z iloczynem rezystancji w poziomie:

$$U''_{CD} = \frac{JR_1 R_2}{\sum R_i + \sum \Delta R_i} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_3 \varepsilon_4). \quad (11)$$

Układ c) – antymostek z iloczynem rezystancji w pionie:

$$U_{AB} = \frac{JR_1 R_4}{\sum R_i + \sum \Delta R_i} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \varepsilon_4 - \varepsilon_2 \varepsilon_3). \quad (12)$$

Wzory (11) i (12) na napięcia wyjściowe antymostków mają formę podobną do wzoru (10) na napięcie wyjściowe zwykłego mostka Wheatstone'a zasilanego prądowo (rys.2). Jednakże napięcia te w inny sposób zależą od znaków przyrostów rezystancji względem ich wartości spełniających stan równowagi. Jako przykład na rys.2 podano znaki przyrostów, które powodują rozrównowanie układów w tym samym kierunku. Przy jednakowych modułach przyrostów rezystancji i tutaj również, jak w klasycznym mostku, uzyskuje się dwukrotny lub czterokrotny wzrost czułości początkowej. Nieliniowość charakterystyk jest podobna jak w klasycznym układzie z rys.2a, lecz we wzorach na napięcia wyjściowe rezystancje zmieniają się miejscami, zgodnie z warunkami równowagi. Dla małych przyrostów ε_i zależności powyższe można linearyzować, gdyż iloczyny ich par stają się pomijalnie małe. Linearyzacja występuje również wtedy, gdy w każdym z iloczynów jeden z przyrostów jest równy zero. Przy zmiennej tylko jednej rezystancji przebieg napięcia wyjściowego jest funkcją homograficzną (przesuniętą hiperbolą, przechodzącą przez środek układu współrzędnych).

Na podstawie wzorów (10)-(12) można wykazać, że przy zmieniających się równocześnie rezystancjach więcej niż jednego z ramion układu i ich przyrostach bezwzględnych parami jednakowych, lecz o przeciwnych znakach, następuje pełna linearyzacja przebiegu napięć wyjściowych również w funkcji dużych przyrostów tych rezystancji. Warunek przeciwstawności przyrostów dotyczy przy tym innych możliwych par rezystancji niż występujących w warunku równowagi danego układu.

Dla mostka klasycznego – układ a) otrzymuje się wówczas: $\varepsilon_1 \varepsilon_3 = \varepsilon_2 \varepsilon_4$ oraz $\sum \Delta R_i = 0$. Wzór (10) upraszcza się wówczas do postaci:

$$U'_{CD} = \frac{JR_1 R_3}{\sum R_i} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (13)$$

Zależność taka zachodzi, gdy np. $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$, $\varepsilon_4 = -\varepsilon_3$, oraz gdy $R_1 = R_2$ i $R_3 = R_4$, lub gdy $\varepsilon_4 = -\varepsilon_1$, $\varepsilon_2 = -\varepsilon_3$ oraz $R_4 = R_1$ i $R_2 = R_3$. Przyrosty rezystancji w sąsiednich ramionach muszą

więc być parami jednakowe, lecz o przeciwnych znakach. Prądy we wszystkich ramionach mostka są wówczas stałe pomimo przyrostów rezystancji. Jest to możliwe do zrealizowania w praktyce jedynie w zakresie $|\varepsilon_i| \leq 1$, na przykład dla mostka zbudowanego z dwu różnych potencjometrów o ruchomych stykach.

W podobny sposób można też uzyskać liniowe przebiegi napięć wyjściowych antymostków. Dla układu b), gdy $\varepsilon_1 \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \varepsilon_4$ oraz $\sum \Delta R_i = 0$, otrzymuje się:

$$U''_{CD} = \frac{J R_1 R_2}{\sum R_i} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (14)$$

Zachodzi to np. wtedy, gdy pary naprzeciwległych rezystancji są jednakowe, a ich przyrosty różnią się tylko znakiem.

Podobnie dla układu c), gdy $\varepsilon_1 \varepsilon_4 = \varepsilon_2 \varepsilon_3$ oraz $\sum \Delta R_i = 0$, otrzymuje się:

$$U_{AB} = \frac{J R_1 R_4}{\sum R_i} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4). \quad (15)$$

4.3. Równoczesny pomiar przyrostów dwu parametrów

Niech parametry czujników zależą w różny sposób od dwu wielkości wpływających x_1 , x_2 , np. przyrosty rezystancji dwu czujników jednakowo zmieniają się wraz z jedną z tych wielkości, a przyrosty od drugiej mają różne znaki, czyli:

$$\varepsilon_1 = k_1 x_1 + k_2 x_2,$$

$$\varepsilon_2 = k_1 x_1 - k_2 x_2,$$

to po odpowiednim włączeniu tych czujników w układ antymostka w sposób pokazany na rys. 1, na przekątnych AB i CD uzyskuje się dwa następujące sygnały:

$$U_{CD} = \frac{J R_1 R_2}{\sum R_i + \sum \Delta R_i} 2k_1 x_1; \quad U_{AB} = \frac{J R_1 R_4}{\sum R_i + \sum \Delta R_i} 2k_2 x_2. \quad (16)$$

Każdy z nich zależy tylko od jednej z wielkości wpływających x_1, x_2 . W ten prosty sposób można zrealizować równoczesny, rozdzielny pomiar obu tych wielkości jedną lub dwoma parami czujników w tym samym układzie antymostka.

Ze wzorów (10-12) wynika też, że podobne zależności można uzyskać z dwu pomiarów: w układzie a) i w jednym z układów b) lub c). Wymaga to jednak przełączania zasilających źródeł prądowych

4.4. Inne układy antymostków

Oryginalną właściwością antymostków, w stosunku do mostków klasycznych, jest dodatkowa możliwość ich równoważenia poprzez zmianę jednego z prądów. Dzięki temu

można tworzyć układy o prądowym ujemnym sprzężeniu zwrotnym, które będą szczegółowo omówione w następnej publikacji.

Wstępną analizę możliwości zastosowania antymostków w układzie z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych omawia publikacja [15]. Otrzymano wyniki podobne jak dla mostków klasycznych.

Antymostki mogą więc z powodzeniem być wykorzystywane jako układy do kondycjonowania sygnałów z czujników parametrycznych pracujące w układzie otwartym lub zamkniętym. Można je stosować zarówno dla czujników pojedynczych i podwójnych, jak i dla czujników różnicowych, przy których uzyskuje się nie tylko dwukrotną czułość, ale i znacznie lepszą liniowość przebiegu napięcia wyjściowego.

5. WNIOSKI

- Antymostki stanowią nowy, dotychczas nie stosowany rodzaj układów pomiarowych o zasilaniu z dwu źródeł prądowych.
- Łączą one w sobie właściwości układów mostkowych i układów kompensacji prądów, gdyż można je zrównoważyć zarówno zmianą składowych zarówno impedancji, jak i któregoś z prądów zasilających.
- Antymostki mogą pracować jako układy zrównoważone, odchyłowe i o sprzężeniu zwrotnym. Przy jednakowych źródłach prądowych warunki równowagi upraszczają się do równości iloczynów impedancji w ramionach przyległych mostka.
- Układy te mają wiele oryginalnych właściwości metrologicznych, których pełne poznanie i wykorzystanie wymaga dalszych badań.
- Szczególnie obiecujące wydaje się zastosowanie antymostków w pomiarach zmiennoprądowych zarówno składowych impedancji, jak i ich przyrostów oraz zastosowanie do kondycjonowania sygnałów z czujników parametrycznych.
- Układ antymostka dysponuje dwoma sygnałami wyjściowymi w różny sposób zależnymi od iloczynów impedancji gałęzi przyległych mostka. Umożliwia to przy prądzie stałym pomiary dwuparametrowe, a przy prądzie zmiennym – czteroparametrowe.
- Realizacja sprzętowa antymostków nie jest obecnie zbyt trudna, pomimo iż wymagają one dwu jednakowych, odizolowanych od siebie galwanicznie, źródeł prądowych, współbieżnych lub też stabilizowanych. Takie źródła są już produkowane jako analogowe układy scalone. Można też przełączać szybko jedno źródło oraz zapamiętywać i odejmować otrzymywane kolejno napięcia wyjściowe.
- Układy antymostków można częściowo realizować wirtualnie, co stwarza zupełnie nowe, nie poznane dotąd możliwości budowy nie tylko wystarczająco dokładnych, ale i szybkich układów pomiarowych zarówno prądu stałego, jak i zmiennego.

LITERATURA

1. Drenowski K.: Pomiary elektryczne. PWN, Warszawa 1959, s. 17.
2. Karandziejew K.B.: Pomiary elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi. WNT, Warszawa 1969 (tłum z ros. wyd. 1963).
3. Haugue B., Foord T.R.: AC Bridge Methods. Pittman, London, 6 edn., 1971 (1th edn. 1947).
4. Szulce A.: Mostki elektryczne pomiarowe. WNT, Warszawa 1967.
5. Schnell L. (ed.) i inni: Technology of Electrical Measurements, J. Wiley & Sons, 1993, ss. 147-223.
6. Nolting B.E. (ed.) i inni: Instrumentation Reference Book, Butterworth Heinemann, 2 wyd. 1995/2000, część 3 ss. 30-56.
7. Webster J.G. (ed.) i inni: The MEASUREMENT, Instrumentation and Sensors Handbook, 1999, część VII, rozdz.: 43,45,50,51.
8. Angrisani L. i inni: A Digital Signal-Processing Instrument for Impedance Measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Meas., vol. 45, no. 6, pp. 930-934, 1996.
9. Warsza Z.L.: Niektóre metody poprawy właściwości metrologicznych gausomierzy hallotronowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1967.
10. Hołuszko E.: Czterogłęziowe układy mostkowe o podwójnym zasilaniu. Materiały XII Międzyuczelnianej Narady Metrologów, Politechnika Poznańska, s. 33-38, Poznań 1977.
11. Kolcov A.A.: Elektriceskije skemy uravnowieszywanja. Energia, Moskwa 1976.
12. Warsza Z.L.: Antymostki – nowy rodzaj układów do pomiaru impedancji. Materiały Konferencji: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra 2000.
13. Warsawsky I.: Multiple-Bridge Circuits for Measurement of Small Changes in Resistance. Review of Scientific Instruments, vol. 26, no. 7, s. 711-715, 1955.
14. Dally J.W. i inni: Instrumentation for Engineering Measurements, J. Wiley & Sons, 2 wyd., 1993, s.173-176.
15. Miczulski W., Warsza Z.: Układ antymostka a przetwarzanie kąta przesunięć fazowych. Materiały Konferencji: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan Kubisa

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 stycznia 2001 r.

Abstract

The introduction and a short review of existing impedance measurement circuits are given. The new type of bridge circuits supplied unconventionally by two current sources, as shown in Fig.1, is proposed under the name **anti-bridge**. The basic equations as well as the properties and possible fields of applications are discussed. Its output voltages U_{AB} and U_{CD}

are given by equations (1) and (2) and balance conditions – by equations (3) and (4). When supply current sources J_1 , J_3 are equal and ideal, these conditions are simplified to Eq. (6a) and (8a) – equality of products of impedances of the neighbouring arms of the bridge.

In part 4 the balanced and unbalanced DC bridge and antibridges, as shown in Fig.2, are discussed and compared. The relations of output voltages and changes of resistances from its balance values are described by means of the equations (10-12), their linear forms – by the equations (14)-(16). In the antibridge with one or two pairs of sensors that change differently their resistances dependent on two measured variables, simultaneous measurement of these variables is possible – see Eq. (16). At the end some conclusion are given.

The balanced anti-bridges could be used for laboratory measurements, and unbalanced ones – for signal conditioning circuits of immittance sensors, for circuits diagnostic and for measurement of changes of material properties. The anti-bridges could be made not only in hardware, but also partially virtual. They associate some properties of classic bridges and current compensation circuits and offer new metrological possibilities.