

# Samokompensujące się oraz przemiennoprądowe mostki dwuprądowe

Zygmunt Lech Warszawa \*

Zarysowano obszary przewidywanych zastosowań układów mostkowych o zaproponowanym poprzednio przez autora niekonwencjonalnym, dwuprądowym zasilaniu (2J) ramion przeciwległych i opisano dotychczasowe badania. Jako kontynuację opracowanych już podstaw teoretycznych mostków (2J) prądu stałego i ich zastosowań w pomiarach wieloparametrowych po raz pierwszy w literaturze światowej podano układ aktywny z mostkiem dwuprądowym samokompensującym się dzięki sprzężeniu zwrotnemu, poprzez zmianę jednego z prądów. Układ ma wymuszony, niezerowy prądowy sygnał wyjściowy o przyroście zależnym od nierównowagi mostka wg równania o takim liczniku jak dla napięcia wyjściowego pasywnego mostka dwuprądowego. Podano też zasadę działania mostków (2J) przemiennoprądowych i omówiono je na przykładzie dwu rodzajów mostków jednoelementowych RC oraz mostków o szeregowych gałęziach 2RC i 2R. Opisano je na tle tych układów przy zasilaniu klasycznym, w mostka Wiena. Wykazano, że mostki przemiennoprądowe, niespełniające strukturalnie fazowego warunku równowagi jako klasyczne, przy zasilaniu dwuprądowym równoważą się w obu przekątnych i z warunków równowagi można określić trzy niezależne parametry mostka.

**DC feedback and AC passive double current supplied bridges.** Fields of predicted application of unconventional double current supplied circuits and shorted information about works made up till now are given. Active feedback DC circuits with double current bridge and shifted current output is proposed and discussed. Three types of AC double current RC bridges are also given and compared with such ones of classic supply including Wien bridge. Some of these new bridges could obtain balance in both diagonals even when classically supplied bridge is structurally unbalanced due their phase relations.

## Potencjalne obszary zastosowań i dotychczasowe badania układów dwuprądowych

Jednym z uwarunkowań rozwoju współczesnej techniki pomiarowej, które można nawet uznać obecnie za główne ograniczenie, jest niedostatek metod pozyskiwania bardziej różnorodnej i trudno dostępnej pierwotnej informacji pomiarowej z badanych obiektów i zawierających czujniki układów wejściowych stosowanych w wielowymiarowych, wielofunkcyjnych i programowalnych przyrządach i systemach pomiarowych. Informacja ta jest niezbędna zarówno w badaniach i testowaniu jak i do sterowania, monitoringu i diagnostyki.

Naprzeciw tym potrzebom wychodzi zaproponowana przez autora metoda niekonwencjonalnego zasilania układów mostkowych z dwu źródeł prądowych dołączonych równolegle do ramionach przeciwległych (2J), lub – tylko z jednego źródła przełączanego pomiędzy tymi ramionami (2xJ). Celem dotychczasowych badań było przede wszystkim stworzenie podstaw teoretycznych zastosowania takich układów prądu stałego w pomiarach kilkuparametrowych. Wymagało to opisu właściwości metrologicznych mostków jako układów czterościankowych (4T) o zmiennych i powiązanych ze sobą prawami Kirchoffa parametrach wewnętrznych. Przyrosty tych parametrów określa się pośrednio z pomiarów na zaciskach układu bez jego rozłączania. Różne

\* Doc. dr inż. Zygmunt Lech Warszawa – Polskie Towarzystwo Metrologiczne

aspekty tych zagadnień autor przedstawił w serii publikacji zawierającej między innymi prace [1-10], a zapoczątkowanej wystąpieniem przed czterema laty na konferencji Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle SP 2000. Jako odniesienie do pełnej oceny zalet układów dwuprądowych były przeanalizowane też możliwości pomiarów dwuparametrowych mostkiem klasycznym [10, 11] oraz zastał opracowany do tego celu opis właściwości metrologicznych mostka jako czwórnika typu X. Te dość obszerne zagadnienia będą ujęte łącznie w przygotowywanej monografii. Są one priorytetowe dla zastosowań i dają się następnie uogólnić i rozszerzyć na układy mostków prądu zmiennego i inne układy dwuprądowo zasilane, w tym układy aktywne. Mostki dwuprądowe już przy prądzie stałym stwarzają wiele nowych możliwości budowy układów pomiarowych, przydatnych w praktyce i wystarczająco dokładnych, w tym do kondycjonowania sygnałów czterokońcówkowych (4T) czujników rezystancyjnych i konduktancyjnych w inteligentnych przetwornikach pomiarowych i do diagnostyki wieloparametrowej. W szczególności dotyczy to równoczesnego badania zmian kilku powiązanych ze sobą parametrów schematu zastępczego obiektu lub wejściowego układu pomiarowego z jego zacisków. Potencjalne możliwości układów dwuprądowo zasilanych są znacznie szersze. Rysują się następujące obszary przewidywanych zastosowań mostków dwuprądowych i zawierających je układów pasywnych i aktywnych w technice pomiarowej:

- pomiary immitancji, ich stosunku oraz różnych kombinacji przyrostów mostkami dwuprądowymi zrównoważonymi i niezrównoważonymi przy prądzie stałym
- zastosowanie dwuprądowych niezrównoważonych mostków prądu stałego w układach kondycjonowania sygnałów pomiarów wieloparametrowych z czujnikami rezystancyjnymi i konduktancyjnymi
- dwuprądowe mostki aktywne prądu stałego ze sprzężeniem zwrotnym
- podobne jak powyższe zastosowania dwuprądowych mostków prądu zmiennego
- dwuprądowe mostki w układach z przetwarzaniem na przesunięcia fazowe
- dwuprądowe mostki w układach z przetwarzaniem na częstotliwość
- inne układy dwuprądowo zasilane zawierające mostki, w tym układy z hallotronami i mnożnikami analogowymi
- pomiary układami dwuprądowymi obiektów wieloparametrowych oraz rozkładów przestrzennych właściwości materiałów i rozkładów pól mierzonych wielkości, w tym do celów diagnostyki technicznej.

Zakres potencjalnych zastosowań mostków dwuprądowych w technice pomiarowej jest więc dosyć rozległy. Podstawy teoretyczne dwu pierwszych obszarów zostały już dość szczegółowo ujęte w publikacjach opracowanych przez autora i zawierają wzory bez uproszczeń. Poniżej podaje się wprowadzenie w problematykę kolejnych dwu zastosowań.

Na kanwie publikacji autora o układach dwuprądowych tematykę tę podjęto też w trzech ośrodkach akademickich w Polsce. Wstępną analizę możliwości zastosowania mostków dwuprądowych prądu zmiennego do pomiarów pojedynczej impedancji metodą z przetwarzaniem zmian składowych impedancji w kąty przesunięć fazowych, zawierała wspólna publikacja W. Miczulskiego i autora z 2000 roku [12]. Otrzymano wyniki wstępnej analizy podobne jak dla mostków klasycznych. W tych pilotowych badaniach nie wykorzystywano jeszcze w pełni oryginalnych właściwości mostków dwuprądowych, które umożliwiają pomiar jednakowych co do znaku przyrostów składowych immitancji w sąsiednich ich ramionach. Ten kierunek badań kontynuuje W. Miczulski wraz z W. Kuleszą z Uniwersytetu Zielonogórskiego [13].

W kolejności należy wymienić związane z Politechniką Śląską wynalazcę i producenta aparatury B. Tynca, który w 2002 roku zbadał wstępnie możliwość połączenia dwuprądowego mostka prądu stałego z opatentowanym przez niego oryginalnym układem przetwornika przyrostów rezystancji na częstotliwość o zasadzie działania zbliżonej do przetworników typu sigma - delta i handlowej nazwie - mostki tybo<sup>®</sup> [14]. Podszedł on do zagadnienia twórczo, zaproponował, a ostatnio sprawdził też eksperymentalnie model układu o zasilaniu ze wspólnego źródła napięcia i wyjściu zarówno z jednej jak i z dwu przekątnych mostka [15].

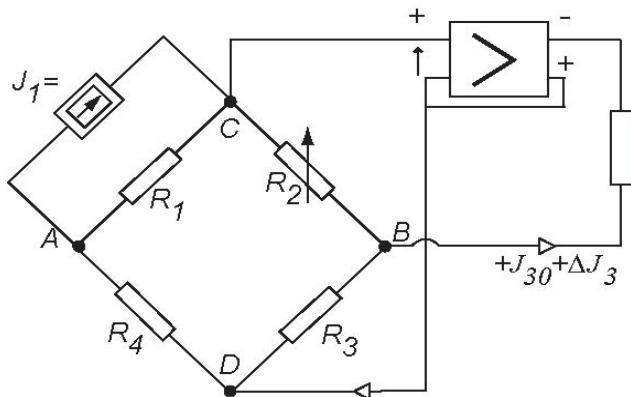
W działalności praktycznej, na przykład przy budowie przetworników na określone zakresy i dla określonych czujników lub przy projektowaniu urządzeń pomiarowych, jako uzupełnienie może okazać się użyteczna szczegółowa analiza numeryczna właściwości metrologicznych różnych wariantów układu przewidywanego do realizacji z uwzględnieniem specyfiki danego zastosowania. Prace laboratoryjne i konstrukcyjne można wtedy poprzedzać komputerowym eksperymentem symulacyjnym. Tym nurtem prac w dziedzinie mostków dwuprądowych zainteresował się A. Idźkowski z Politechniki Białostockiej. Zasymulował on niektóre zależności mostków dwuprądowych, omawiane już w pracach autora, wykorzystując standardowe oprogramowanie SPICE [16]. Wspólnie z drem J. Makalem, opisują eksperyment symulacyjny zawierający zależności napięcia wyjściowego dla dwu wariantów dwuprądowego mostka prądu stałego oraz propozycję układu ze wzmacniaczem operacyjnym i wyjściem napięciowym. Metody symulacyjne mogą okazać się w szczególności bardzo przydatne do badania granic obszarów zmian błędów pomiarowych o dość skomplikowanych zależnościach w pasywnych i aktywnych układach dwuprądowych z nieliniowymi czujnikami do pomiarów wieloparametrowych.

Oryginalne prace autora nad nowymi układami mostkowymi znalazły też pewien oddźwięk poza krajem. Dzięki ich prezentacji na wspólnych dorocznych sympozjach Politechnik Rzeszowskiej i Lwowskiej [5, 7] zainteresowało się nimi kilku pracowników tych uczelni zajmujących się tomografią impedancyjną.

W języku angielskim ukazała się dotąd na ten temat jedna publikacja autora [4], referowana na Sympozjum Komitetu TC-4 Międzynarodowej Konfederacji Pomiarów IMEKO w maju 2002 roku w Krakowie. Zagadnienia okazały się na tyle aktualne, że tuż po tym wystąpieniu znany międzynarodowy autor książek z techniki pomiarowej prof. P. Sydenham, z Australii, zaproponował autorowi opracowanie sześciu obszernych bloków tematycznych o mostkach do multimedialnego poradnika z techniki pomiarowej Measure Mentor, przygotowywanego przez angielską filię wydawnictwa J. Wiley & Sons na koniec 2004 roku i przewidywanego również do udostępnienia w internecie na hasło-klucz.

### Układ aktywny prądu stałego z mostkiem dwuprądowym

Oryginalną właściwością mostków dwuprądowych, w stosunku do pasywnych mostków klasycznych o pojedynczym zasilaniu, jest możliwość ich równoważenia również poprzez zmianę jednego z prądów. Dzięki temu można tworzyć układy samo kompensujące się. Przykład takiego układu, podano na rysunku 1.



Rys. 1. Mostek dwuprądowy w układzie o niezerowym wyjściu prądowym

Jest to układ o prądowym ujemnym sprzężeniu zwrotnym i o wymuszonym wyjściu prądowym z przesuniętym zerem sygnału. Układy o takim znormalizowanym wyjściu analogowym stosuje się powszechnie w pomiarach i automatyce przemysłowej z kilku podstawowych powodów, takich jak: możliwość zasilania układu od strony odbiornika linią dwuprzewodową, niezależność sygnału od zmian rezystancji obciążenia w szerokich granicach oraz rozróżnianie przerwy w obwodzie wyjściowym od początku zakresu sygnału. Wzmacniacz, dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu, doprowadza do stanu równowagi mostek dwuprądowy włączony na wejściu. Wówczas  $U_{DC} = 0$ , a początkowy prąd wyjściowy  $J_{30}$  wynosi:

$$J_{30} = J_1 \frac{R_{10}(R_{20} + R_{30})}{R_{30}(R_{10} + R_{40})} \tag{1}$$

Podobnym równaniem opisuje się też prąd wyjściowy  $J$  przy dowolnych wartościach rezystancji mostka:

$$J \equiv J_{30} + \Delta J_3 = J_1 \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_3(R_1 + R_4)} \tag{2}$$

Z (1) i (2) otrzymuje się:

$$\Delta J_3 = J_1 \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{R_3(R_1 + R_4)} \tag{3}$$

Licznik tego równania jest taki sam jak dla dwuprądowego mostka pasywnego. Mierzając przyrost wyjściowego prądu, można uzyskać rezultaty podobne jak poprzednio dla pasywnych mostków dwuprądowych przy pomiarach przyrostów pojedynczej rezystancji i kombinacji kilku przyrostów. Na przykład, gdy  $R_1 = const.$ ,  $R_3 = const.$ ,  $R_4 = const.$ , to dla przyrostów bezwzględnych  $\Delta R_2$  lub względnych  $\varepsilon_2$  rezystancji  $R_2$  otrzymuje się:

$$\Delta J_3 = J_1 \frac{\Delta R_2}{R_3 + R_{20}} \tag{4a}$$

lub

$$\Delta J_3 = J_1 \frac{R_{20}}{R_3 + R_{20}} \varepsilon_2 \tag{4b}$$

Układ działa przy jednym kierunku prądu wyjściowego. Zmiany czułości można dokonywać przez regulację stabilizowanego prądu  $J_1$  lub dobór rezystancji  $R_3$  i  $R_{20}$  wraz z regulacją początku zakresu innym rezystorem mostka. Regulację zera umożliwia też dodatkowe regulowane źródło prądowe, dołączane równolegle do gałęzi  $R_3$ , którego nie uwidoczniiono na rysunku. Budowa układu nie wymaga rozłączania mostka wejściowego. Układ nadaje się więc również do badania zmian wartości elementów mostkowych schematów zastępczych różnych obiektów. Dodatkowo można też wykorzystywać napięcie przekątnej AB mostka:

$$U_{AB} = J_1 \frac{R_1(R_4 - R_2)}{R_1 + R_4} \tag{5}$$

Jest ono równe zeru, gdy  $R_2 = R_4$ .

Powyższy układ autor przedstawił wstępnie w referacie wprowadzającym w tę tematykę, po raz pierwszy w styczniu 2000 roku na dorocznym seminarium Komisji Kształcenia Komitetu Metrologii PAN w ośrodku Ministerstwa Edukacji „Ustroń” k. Wieruszowa. Nie był on jednak dotąd publikowany i takiego rozwiązania układu autor nie spotkał w literaturze.

### Dwuprądowe mostki RC

Ogromnym i perspektywicznym obszarem zastosowań idei dwuprądowego zasilania są nowe rozwiązania mostków prądu zmiennego o różnych przebiegach. Jeśli impedancje  $Z_i$  mostka czteroramiennego zostaną oznaczone podobnie jak rezystancje na rysunku 1, tj. w kolejności zgodnej z ruchem wskazówek zegara, to przy obocznym zasilaniu mostka z dwu jednakowych przeciwnych źródeł prądowych  $J$  prądu przemien-

nego o jednej częstotliwości, lub z jednego przełączanego takiego źródła, napięcia wyjściowe na przekątnych mostka są opisane następującymi ogólnymi równaniami zmiennej zespolonej:

$$U_{DC} = J \frac{Z_1 Z_2 - Z_3 Z_4}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \quad (6)$$

oraz

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

Zaś warunki równowagi są następujące:

$$Z_1 Z_2 = Z_3 Z_4 \quad (6a)$$

oraz

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

Iloczyn w tych wzorach dotyczy impedancji ramion sąsiadujących z zaciskami danego wyjścia i są zespolone. Każde z równań (6a) i (7a) sprowadza się więc do dwu warunków rzeczywistych w postaci równości składowych prostokątnych lub biegunowych obu jego stron. Na przykład, dla zależności (6a) otrzymuje się:

$$Re(Z_1 Z_2) = Re(Z_3 Z_4)$$

i

$$Im(Z_1 Z_2) = Im(Z_3 Z_4) \quad (6b)$$

lub

$$|Z_1| |Z_2| = |Z_3| |Z_4|$$

i

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_3 + \varphi_4 \quad (6c)$$

a dla zależności (7a)

$$Re(Z_1 Z_4) = Re(Z_2 Z_3)$$

i

$$Im(Z_1 Z_4) = Im(Z_2 Z_3) \quad (7b)$$

lub

$$|Z_1| |Z_4| = |Z_2| |Z_3|$$

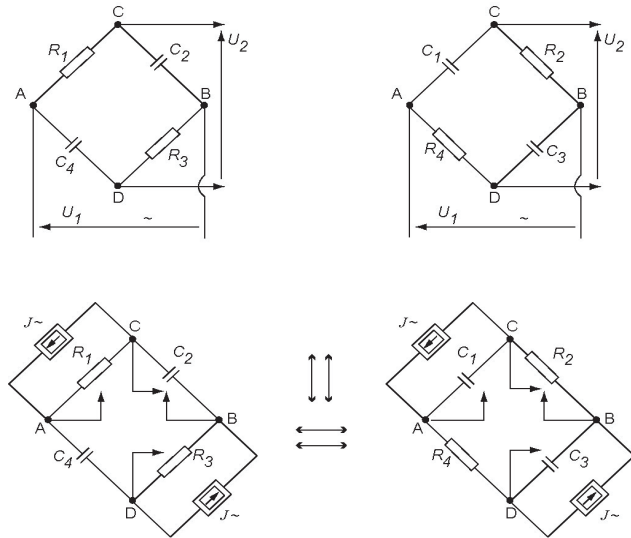
i

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (7c)$$

Wszystkie inne wzory i zależności podane dla prądu stałego w pracach [1-9], na przykład dotyczące warunków linearyzacji napięć wyjściowych mostka obowiązują tu będą w postaciach zespolonych.

W celu bliższego poznania zagadnień rozpatrzmy kilka przykładów mostków dwuprądowych RC počawszy od układów najprostszyc o ramionach jednoelementowych.

Na rys. 2, w górnej części przedstawiono dwa warianty przesuwника fazy RC. Przy klasycznym zasilaniu dołączonym do zacisków AB układ ten strukturalnie nie spełnia fazowego warunku równowagi mostka, gdyż suma faz dla pary rezystancji przeciwległych zawsze



Rys 2. Proste przesuwники fazy RC (u góry) i odpowiadające im dwa mostki dwuprądowe

równa jest zero, a dla pary kondensatorów:  $-180^\circ$ . Na przykład, dla pierwszego z tych układów, przy jednakowych rezystancjach  $R_1 = R_3 \equiv R$  oraz jednakowych kondensatorach  $C_2 = C_4 \equiv C$  napięcie wyjściowe wynosi:

$$U_2 = U_1 e^{2j \arctan \omega RC} \quad (8)$$

Amplitudy napięcia wyjściowego i wejściowego są tu takie same, a ich przesunięcie fazy zależy od iloczynu  $\omega RC$ . Dla  $\omega RC = 1$  napięcia te są prostopadłe na wykresach wskazowych obydwu układów przesuwника fazy RC.

Natomiast w umieszczonych na dole tego rysunku takich samych jednoelementowych mostkach RC, ale zasilanych już dwuprądowo, warunki równowagi dla obu przekątnych są następujące:

$$\text{dla } U_{DC} = 0$$

$$R_1 C_4 = R_3 C_2$$

oraz

$$R_4 C_1 = R_2 C_3 \quad (9a,b)$$

dla

$$U_{AB} = 0$$

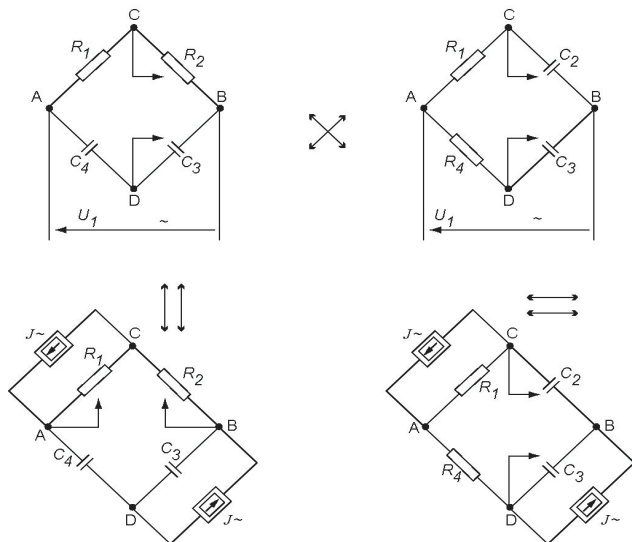
$$R_1 C_2 = R_3 C_4$$

oraz

$$R_2 C_1 = R_4 C_3 \quad (9c,d)$$

Są one są różne dla obu przekątnych, ale warunek fazowy jest zawsze spełniony. Taką samą czwórkę warunków otrzyma się, gdy źródła prądowe dołączy się równolegle do obu pojemności. Ze wzorów (9a,b,c,d) wynika, że przy równości stosunków odpowiednich par rezystancji  $R$  i pojemności  $C$  układy te są w ciągłej równowadze i to w obu przekątnych oraz bez względu na częstotliwość.

Na rys. 3 podano proste jednoelementowe mostki RC zasilane po przekątnej, a poniżej te same mostki zasilane dwuprządowo. Strzałki umieszczone obok schematów pokazują symbolicznie położenie immitancji układu tworzących iloczyn warunków równowagi, a strzałki wychodzące z wierzchołków – wyjścia ze stanem zerowym.



**Rys. 3.** Mostki klasyczne jednoelementowe RC i odpowiadające im dwa, z czterech możliwych układów dwuprządowo zasilanych

Warunki równowagi podanych tu mostków klasycznych (przy  $U_{DC} = 0$ ) są następujące:

$$R_1 C_4 = R_2 C_3 \tag{10a}$$

oraz

$$R_1 C_2 = R_4 C_3 \tag{10b}$$

Nie zależą one od częstotliwości.

Te same układy mostków RC przy zasilaniu z dwu jednakowych źródeł prądowych  $J$  mają inne warunki równowagi:

dla

$$U_{DC} = 0:$$

$$R_1 R_2 \neq \frac{1}{(j\omega)^2 C_3 C_4}$$

oraz

$$R_1 C_3 = R_4 C_2 \tag{11a,b}$$

dla  $U_{AB} = 0:$

$$R_1 C_3 = R_2 C_4$$

oraz

$$R_1 R_4 \neq \frac{1}{(j\omega)^2 C_2 C_3} \tag{11c,d}$$

W lewym mostku dwuprządowym może zostać spełniony tylko warunek równowagi (11c) dla wyjścia AB, zaś dla prawego układu – tylko warunek (11b) wyjścia

DC. Podobnie jak poprzednio przy równości stosunków obu parametrów  $R$  oraz  $C$  układy te są w ciągłej równowadze dla obu przekątnych i to niezależnie od częstotliwości.

Na rys. 4 znajduje się mostek Wiena z dwoma szeregowymi gałęziami RC, połączony na dwa sposoby. Ten układ wybrano dlatego, iż był on historycznie pierwszym w pełni prawdziwym mostkiem prądu przemiennego, chociaż przy opisie impedancyjnym gałęzi prostsze zależności uzyskuje się dla mostka Maxwella. We wcześniejszych rozwiązaniach mostków i układów służących do badania parametrów dokonywano kolejno dwu równoważeń: statycznego dla prądu stałego i dynamicznego – przy jego przełączaniu z wykorzystaniem galwanometru balistycznego jako detektora zera. Przy oznaczeniach jak na tym rysunku, mostki Wiena o strukturze a) oraz b) mają zespolone warunki równowagi (12) i (13) oraz wynikające z porównania ich składowych pary warunków rzeczywistych (12', 12'') i (13', 13''):

Przy takich samych wartościach składowych  $Z_1$ , oraz  $R_2 = R_4$ , w układzie a) uzyskuje się większą czułość napięciową niż w układzie b), największą, gdy  $|Z_1| = R_2$ . Dla pomiarów  $R_1, C_1$  rozdzielny odczyt dla warunków (12', 12'') otrzymuje się przy regulacji  $R_4$  i  $C_4$ , a dla warunków (13', 13'') przy  $R_2$  i  $C_2$ .

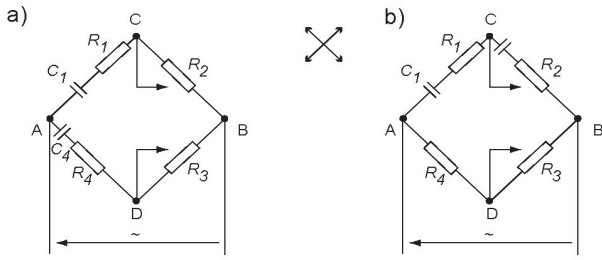
Na rys. 5. podano po dwa dwuprządowe odpowiedniki mostków Wiena z rys. 4 o szeregowych schematach impedancji ramion. Możliwych wariantów jest łącznie sześć, po trzy dla źródeł prądowych dołączanych równolegle bądź do gałęzi RC, bądź do gałęzi R. Z układów o pierwszym ramieniu w postaci samej rezystancji  $R_1$  podano tylko układ d). Nie ma tu pozostałych dwu schematów o zamienionych miejscami immitancjach bądź ramionach 2 i 4, bądź 2 i 3. Mają one takie same warunki równowagi jak układy a) i c), jedynie o innych indeksach pochodzących od numeracji ramion.

Zespolone warunki równowagi dla obu wyjść mostków dwuprządowych a, b, c, d, wraz z parami ich rzeczywistych warunków równowagi, ujęto we wzorach (14a,b) – (17a,b).

Dla układu a) nie można spełnić warunku (14'a), a dla układu b) – warunku (15'b). Układy te osiągają więc równowagę tylko dla jednego z wyjść. Drugą, odmienną parę warunków bez rozłączania mostka można uzyskać po zmianie zasilania na klasyczne.

Natomiast układy c) i d) o jednakowym charakterze fazowym ramion przeciwległych, które nie równoważą się przy zasilaniu klasycznym, przy zasilaniu dwuprządowym równoważą się dla każdego z wyjść. Postępując podobnie jak dla mostka 2J zrównoważonego prądu stałego [8 cz. 1], tj. doprowadzając kolejno dla każdego wyjścia układ do równowagi, uzyskuje dwie różne pary nastaw. Tylko trzy z nich są od siebie niezależne. Można więc wyznaczyć wartości trzech parametrów układu. Rozpatrzmy to na przykładzie układu c). Regulując dwukrotnie do stanu równowagi parametry trzeciego ramienia, uzyskuje się pary nastaw  $R_{3a}, C_{3a}$  oraz  $R_{3b}, C_{3b}$ . Z nich otrzymuje się:

### Mostki Wiena



Rys. 4. Mostek Wiena przy dwu wariantach połączenia gałęzi

#### układ 4a)

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}\right) R_2 \quad (12)$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (12')$$

$$C_1 R_2 = R_3 C_4 \quad (12'')$$

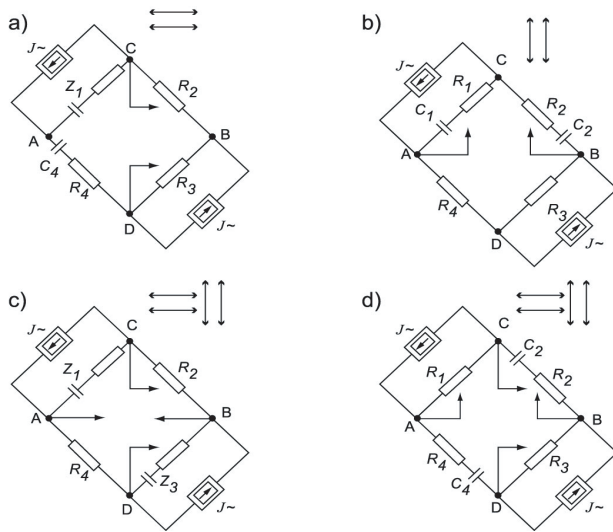
#### układ 4b)

$$\left(R_1 + \frac{l}{j\omega C_1}\right) R_3 = \left(R_2 + \frac{l}{j\omega C_2}\right) R_4 \quad (13)$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (13')$$

$$C_1 R_4 = C_2 R_3 \quad (13'')$$

### Mostki dwuprądowe RC-R



Rys. 5. Mostki dwuprądowe prądu przemiennego odpowiadające mostkowi Wiena z rys. 4 charakterem immitancji gałęzi

#### układ 5b)

dla wyjścia DC

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) = R_3 R_4 \quad (15a)$$

$$R_1 R_2 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} = R_3 R_4 \quad (15'a)$$

$$\frac{R_2}{C_1} + \frac{R_1}{C_2} \neq 0 \quad (15''a)$$

dla wyjścia AB

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_4 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) R_3 \quad (15b)$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (15'b)$$

$$C_1 R_3 = C_2 R_4 \quad (15''b)$$

#### układ 5c)

dla wyjścia DC

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_2 = \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}\right) R_4 \quad (16a)$$

$$R_1 R_2 = R_3 R_4 \quad (16'a)$$

$$C_1 R_4 = C_3 R_2 \quad (16''a)$$

dla wyjścia AB

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_4 = \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}\right) R_2 \quad (16b)$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (16'b)$$

$$C_1 R_2 = C_3 R_4 \quad (16''b)$$

#### układ 5d)

dla wyjścia DC

$$R_1 \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) = R_3 \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}\right) \quad (17a)$$

$$R_1 R_2 = R_3 R_4 \quad (17'a)$$

$$C_2 R_3 = C_4 R_1 \quad (17''a)$$

dla wyjścia AB

$$R_1 \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}\right) = R_3 \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) \quad (17b)$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (17'b)$$

$$C_2 R_1 = C_4 R_3 \quad (17''b)$$

#### układ 5a)

dla wyjścia DC

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_2 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}\right) R_3 \quad (14a);$$

$$R_1 R_2 = R_3 R_4 \quad (14'a)$$

$$C_1 R_3 = C_4 R_2 \quad (14''a)$$

dla wyjścia AB

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}\right) \neq R_2 R_3 \quad (14b)$$

$$R_1 R_4 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_4} = R_2 R_3 \quad (14'b)$$

$$\frac{R_4}{C_1} + \frac{R_1}{C_4} \neq 0 \quad (14''b)$$

$$R_1 = \sqrt{R_{3a} R_{3b}} \quad (18a)$$

$$C_1 = \sqrt{C_{3a} C_{3b}} \quad (18b)$$

$$R_2 = R_4 \sqrt{\frac{R_{3b}}{R_{3a}}} \quad (18c)$$

Poza nastawami trzeba więc znać wartość tylko jeszcze jednej z rezystancji  $R_4$  lub  $R_2$ . Dokonując obu pomiarów dwukrotnie, w tym dla wartości początkowych powyższych parametrów, na podstawie tych wzorów można wyznaczyć też przyrosty bezwzględne i względne tych parametrów.

Równowagę mostka dwuprądowego w obu przekątnych równocześnie uzyskuje się wtedy, gdy składowe początkowe immitancji ramion przeciwnych są parami jednakowe. Dotyczy to na przykład układów c) i d) z rys. 5. Dla pierwszego z nich, przy  $Z_{10} = Z_{30}$  i  $R_{20} = R_{40}$ , z (6) i (7) otrzymuje się:

$$U_{DC} = J \frac{Z_{10} R_{20}}{2(Z_{10} + R_{20})} \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2} - \varepsilon_{R3} - \varepsilon_{R4} + j\varepsilon_{X1} - j\varepsilon_{X3} + (\varepsilon_{R1} + j\varepsilon_{X1})\varepsilon_{R2} - (\varepsilon_{R3} + j\varepsilon_{X3})\varepsilon_{R4}}{1 + \frac{\sum \Delta_{Ri} + j\Delta_{X1} + j\Delta_{X3}}{2(Z_{10} + R_{20})}} \quad (19)$$

oraz

$$U_{AB} = J \frac{Z_{10} R_{20}}{2(Z_{10} + R_{20})} \frac{\varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2} - \varepsilon_{R3} + \varepsilon_{R4} + j\varepsilon_{X1} - j\varepsilon_{X3} + (\varepsilon_{R1} + j\varepsilon_{X1})\varepsilon_{R4} - (\varepsilon_{R3} + j\varepsilon_{X3})\varepsilon_{R2}}{1 + \frac{\sum \Delta_{Ri} + j\Delta_{X1} + j\Delta_{X3}}{2(Z_{10} + R_{20})}} \quad (20)$$

gdzie:  $Z_{10}$ ,  $R_{20}$  - impedancja  $Z_1$  i rezystancja  $R_2$  w stanie równowagi,

$\Delta_{Ri}$ ,  $\Delta_{Xi}$  - przyrosty bezwzględne składowych rzeczywistych i urojonych impedancji  $Z_i$ ,

$\varepsilon_{Ri}$ ,  $\varepsilon_{Xi}$  - ich przyrosty względne określone do  $Z_{i0}$ .

Wzory te upraszczają się dla małych przyrostów składowych immitancji oraz gdy  $\varepsilon_{R2}=0$ ,  $\varepsilon_{R4}=0$ , a ponadto gdy niektóre z przyrostów są parami bądź jednakowe, bądź przeciwne (w czujnikach różnicowych) lub są określone inne zależności fazowe. Cztery przyrosty, na przykład obu składowych impedancji  $Z_1$ ,  $Z_3$ , albo też wielkości wywołujących te przyrosty, można wyznaczyć z fazoczułych pomiarów składowych napięć obu wyjść. Rozwiązania szczegółowe dla każdego rodzaju przyrostów i wielu istniejących mostków prądu przemiennego wymagają indywidualnych opracowań.

## Podsumowanie

Oryginalna, zaproponowana poprzednio przez autora idea dwuprądowego zasilania (2J) układów pomiarowych zawierających mostki i jej alternatywa (2xJ) - uśrednianie dwu pomiarów przy przełączaniu pojedynczego źródła [1-9], stwarza możliwości budowy wielu pasywnych i aktywnych dwuwyjściowych analogowych układów kondycjonowania sygnałów prądu stałego i przemiennego o nowych właściwościach metrologicznych.

W publikacji tej, wg wiedzy autora, **po raz pierwszy w literaturze światowej** podano i omówiono samokompensujący się **mostek dwuprądowy o sprzężeniu zwrotnym** oraz **mostki dwuprądowe prądu przemiennego**, na przykładzie mostków o ramionach R, C i RC-R. Wnioski szczegółowe zamieszczone są w treści rozdziałów.

Dla każdego z istniejących rozwiązań mostków klasycznych prądu zmiennego można podać po dwa (a z permutacją gałęzi i źródeł - aż nawet po 6) układów mostków dwuprądowych. Przy dwuprądowym zasilaniu równoważyć w obu przekątnych nawet takie układy, w których przy zasilaniu klasycznym impedancje strukturalnie nie spełniają warunku równości sumy faz w ramionach przeciwnych - patrz rysunki 2., 3. oraz 5.

Ze względu na podobieństwo formy wzorów (6) i (7) dla napięć niezrównoważenia mostków dwuprądowych do znanego wzoru dla mostków klasycznych zasilanych prądowo, przebiegi amplitudy i fazy w funkcji przyrostów składowych immitancji ramion są też podobne, ale dotyczą innych ramion.

Układy dwuprądowe (2J) i (2xJ) mogą służyć do równoczesnych pomiarów kilku parametrów wewnętrznych układu z jego zacisków oraz do pośrednich pomiarów kilku wielkości wpływających różnie na składowe immitancji czujników nieselektywnych, podlegające mierzeniu przy jednej lub kilku częstotliwościach.

Zasilanie dwuprądowe może też znaleźć zastosowanie w układach z detektorami fazoczułymi i quazi zrównoważonych, w układach z hallotronami i innymi mnożnikami sygnałów oraz w układach z szybkim wielokrotnym próbkowaniem w czasie jednego okresu.

Układy 2J i 2xJ można też częściowo realizować wirtualnie.

Wiele zagadnień szczegółowych wymaga jeszcze dalszych badań.

Zdaniem autora koncepcja dwuprądowego zasilania ramion przeciwnych stanowi istotny przełom w pomiarach z wykorzystaniem mostków. Jest ona jak dotychczas rozwijana tylko w Polsce. Może więc stać się, nie za często występującym, trwałym polskim wkładem w tę dziedzinę techniki pomiarowej.

### Bibliografia

- [1] Warszawa Z. L.: *Antymostki – nowy rodzaj układów do pomiaru impedancji*. Materiały Konferencji: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra, 2000, s. 233-240.
- [2] Warszawa Z. L.: *Pomiary impedancji układami mostkowymi o dwuprądowym zasilaniu*. Pomiary, Automatyka, Robotyka, 5/2001, s. 17-21 oraz Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 178, Gliwice 2001, s. 131-143.
- [3] Warszawa Z. L.: *Bridges Supplied by Two Current Sources – New Tool for Impedance Measurements and Signal Conditioning*, Proc. of IMEKO-TC 7 Symposium, Kraków, maj 2002, s. 231-236.
- [4] Warszawa Z. L.: *Analiza czułości mostków rezystancyjnych dwuprądowo zasilanych*. Materiały konferencji SP 2002 Zielona Góra, Pomiary Automatyka Kontrola 7/8 2002 s. 109-112.
- [5] Warszawa Z. L.: *Zastosowanie dwuprądowo zasilanych mostków prądu stałego do kondycjonowania sygnałów z czujników pomiarowych*. Materiały IX Międzynarodowego Seminarium Metrologów „Metody i Technika Przetwarzania Sygnałów Fizycznych”, Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej nr 192 (Elektrotechnika 22), s. 231-241, 2002.
- [6] Warszawa Z. L.: *Dwuprądowe mostki pomiarowe*. część I i II. Prace naukowe Politechniki Radomskiej, seria Elektryka 1/4, 2002, s. 6-60.
- [7] Warszawa Z.: *Rodzaje zastosowań mostków dwuprądowych*. Materiały X Międzynarodowego Seminarium Metrologów „Metody i Technika Przetwarzania Sygnałów Fizycznych”, Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej nr 200 (Elektrotechnika 24), s. 163-170, 2002.
- [8] Warszawa Z. L.: *Dwuprądowe mostki prądu stałego*. Część I *Zależności podstawowe, układy zrównoważone*, Pomiary Automatyka Kontrola 4/2003 – wkładka Metrologia Technika Pomiarowa, s. II – IV; Część II *Układy niezrównoważone, przykłady i obszary ich zastosowań* Pomiary Automatyka Kontrola 12/2003 – wkładka Metrologia Technika Pomiarowa, s. I – IV.
- [9] Warszawa Z. L.: *Zastosowania dwuprądowego mostka prądu stałego w pomiarach wieloparametrowych*. Materiały konferencji Podstawowe Problemy Metrologii – PPM'03 Ustroń 2003, Prace Komisji Metrologii oddziału PAN w Katowicach, seria Konferencje nr 5, s. 257-270.
- [10] Warszawa Z. L.: *Pomiary wieloparametrowe mostkami rezystancyjnymi o różnym prądowym zasilaniu*, Pomiary Automatyka Robotyka, część 1: 7/8 2003 s. 5-11, część 2: 9 2003, s. 21-25.
- [11] Warszawa Z. L.: *Rezystancyjny mostek jednoprądowy w pomiarach dwuparametrowych*, część 1 Pomiary Automatyka Kontrola 12/2003, wkładka s. V-VIII.
- [12] Miczulski W., Warszawa Z.: *Układ antymostka z przetwarzaniem kąta przesunięć fazowych*, Materiały Konferencji: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra, 2000.
- [13] Kulesza W., Miczulski W.: *Zastosowanie metody PKPF w układzie mostka dwuprądowego* Materiały XIII Sympozjum Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych, Wydawnictwo Katedry Metrologii AGH, Kraków 2003, s. 245-254.
- [14] Tync B.: *Mostki Tybo® ładunkowo równoważone układy jako oryginalne przetworniki A/C*, Pomiary Automatyka Kontrola 3/2002, s. 21-23.
- [15] Tync B.: *Ładunkowo równoważony układ mostkowy o dwuprądowym zasilaniu*, Materiały Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów Ustroń 2004, Politechnika Gliwicka.
- [16] Idźkowski A., Makal J.: *Mostek zasilany dwuprądowo – eksperyment i symulacja*. Materiały Sympozjum SP 04, Uniwersytet Zielonogórski. ■