

Mostki dwuźródłowe jako nowy rodzaj układów pomiarowych

Zygmunt Lech Warsza

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: W pracy omawia się podstawowe zależności i stan badań niekonwencjonalnych układów pomiarowych w postaci mostków czteroramiennych o dwu źródłach i dwu wyjściach z obu przekątnych. Dwa jednakowe źródła prądu lub napięcia są odpowiednio dołączone do przeciwległych gałęzi mostka. Podano wzory dla napięć wyjściowych i warunki równowagi obu wyjść mostków dwuźródłowych przy prądzie stałym (DC). Dla mostków dwuprądowych są to równości iloczynów rezystancji ramion przyległych do końcówek każdego z wyjść, a dla mostków dwunapięciowych – równości sum dwu rezystancji ramion. Oba te rodzaje mostków przy zrównoważeniu kolejno każdego z wyjść umożliwiają pomiary dwu różnych rezystancji (lub konduktancji) ich ramion. Ich sygnały wyjściowe zależą zaś od różnych liniowych kombinacji przyrostów rezystancji ramion od wartości w stanach równowagi. Jako przykład zastosowania rozpatrzono równoczesny pomiar odkształcenia i przyrostu temperatury różnicowym dwuelementowym czujnikiem tensometrycznym. Krótko scharakteryzowano stan prac teoretycznych i wyniki badań eksperymentalnych układów mostków dwuprądowych DC oraz prototypowych konstrukcji przyrządów pomiarowych i stanowisk laboratoryjnych na nich opartych.

Słowa kluczowe: mostki dwuprądowe, mostki dwunapięciowe, dwa różne wyjścia, dwie rezystancje, przyrosty rezystancji

1. Wprowadzenie

W pomiarach obiektów wieloparametrowych mierzy się ich parametry zarówno bezpośrednio, jak i z użyciem układu czujników. Aby wyznaczyć numerycznie parametry modelu matematycznego opisującego funkcjonowanie badanego obiektu, konieczne jest wyznaczenie występujących równocześnie powiązań jego parametrów ze sobą i z oddziałującymi wielkościami zewnętrznymi, zarówno zdeterminowanymi, jak i losowymi. Oddziaływania te wpływają w różny sposób i zwykle nieselektywnie na mierzone parametry modelu. Ponadto niemal wszystkie czujniki pomiarowe nie są selektywne. Pomiary wpływu pojedynczej wielkości przy ustabilizowanych pozostałych, nawet w warunkach laboratoryjnych są możliwe tylko w nielicznych przypadkach. Zwykle trzeba mierzyć równocześnie wpływy kilku powiązanych ze sobą parametrów wspólnym systemem pomiarowym i przy zastosowaniu czujników, na parametry których oddziałują nie tylko wielkości mierzone, ale i różne inne, w tym temperatura otoczenia.

Autor korespondujący:

Zygmunt Lech Warsza, zlw1936@gmail.com

Artykuł recenzowany

nadesłany 14.07.2023 r., przyjęty do druku 04.09.2023 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Przykładem są pomiary tensometryczne. Zmiany rezystancji tensometru zależą nie tylko od jego odkształcenia, ale i od temperatury. Trzeba więc mierzyć jej zmiany albo dodatkowym czujnikiem temperatury, albo takim samym nieodkształcanym tensometrem, by jej wpływ kompensować już w wejściowym układzie analogowym lub w dalszej cyfrowej części systemu pomiarowego. Taki pomiar może być obciążony dodatkowym błędem od zmian rezystancji tensometru wskutek grzania własnego, gdy dla podwyższenia czułości zastosuje się zbyt duży prąd płynący przez tensometr. To niepożądane oddziaływanie zmian temperatury na rezystancję tensometru można też wykorzystać do pomiarów rzeczywistej jego temperatury i korekty jej wpływu. Taka możliwość powstaje przy stosowaniu czujnika różnicowego o dwu jednakowych tensometrach – ściskanym i rozciągającym. Jeśli powstające w nich przyrosty rezystancji od zmian odkształcenia, jako efekt mierzonej siły lub jej momentu, będą miały różne znaki, a od temperatury jednakowe, to możliwy jest równoczesny pomiar obu oddziałujących wielkości. W tym celu w układzie pomiarowym należy utworzyć dwa sygnały wyjściowe – dla różnicy i sumy zmian rezystancji obu tensometrów czujnika różnicowego. Pierwszy z nich, jako podstawowy, będzie zależał od ich odkształceń, a drugi, pomocniczy – od zmian temperatury czujnika. W dalszej analogowej lub cyfrowej części układu pomiarowego ten drugi sygnał można następnie też wykorzystać do korekty wpływu temperatury na wartość początkową rezystancji i na współczynnik czułości tensometrycznego czujnika różnicowego.

Zaproponowano, by do równoczesnych, powiązanych ze sobą pomiarów dwuparametrowych w obiekcie badanym lub w czujniku stosować mostki o dwu źródłach prądowych [3] oraz o dwu napięciowych [6, 33]. Mostki te stanowią odrębny, wcześniej nieopisywany, rodzaj układów pomiarowych. Autor opracował:

podstawy teoretyczne mostków dwuzródłowych jako zrównoważonych i odchyłowych dla prądu stałego DC i przemiennego AC, zasady szacowania ich dokładności jako zrównoważonych i odchyłowych oraz przykłady ich zastosowań w monografii [6] i innych pracach [3–10]. Używa też dla nich następujących nazw i symboli: mostki dwuprądowe (2J), mostki dwunapięciowe (2E), o dwu wyjściach: napięciowych (2U) lub prądowych (2I). W zrównoważonych układach mostkowych, oba źródła powinny być tylko jednakowe, lub też należy uśredniać wyniki z dwu pomiarów przy przełączaniu ich miejscami. W mostkach odchyłowych źródła muszą mieć znane wartości i być stabilizowane. Przy prądzie stałym DC można mierzyć dwie rezystancje lub dwie konduktancje, lub sumy i różnice ich przyrostów od wartości w równowadze wyjść, również równocześnie. Układami dwuzródłowymi prądu przemiennego AC można mierzyć składowe dwu impedancji i ich przyrosty [6].

Poniżej przedstawiono podstawowe zależności dla obu rodzajów mostków dwuzródłowych, tj. dwuprądowych i dwunapięciowych, jako zrównoważonych i odchyłowych oraz przykład zastosowania mostka dwunapięciowego do pomiarów dwu wielkości tensometrycznym czujnikiem różnicowym. Krótko omówiono stan prac o mostkach dwuzródłowych i proponowane kierunki badań rozwojowych.

2. Mostki rezystancyjne dwuprądowe

Klasyczny rezystancyjny mostek Wheatstone’a zasilany ze źródła prądowego i rezystancyjny mostek dwuprądowy przedstawione są na rysunku 1.

W obu układach cztery rezystancje $R_1 \dots R_4$ tworzą jedno oczko, ale różnią się liczbą źródeł zasilania, sposobem ich dołączenia i liczbą wyjść. Mostek klasyczny z rys. 1a podano dla porównania. Mostek dwuprądowy z rys. 1b, (c) ma dwa idealne źródła prądu stałego (DC) J_1, J_2 dołączone obocześnie do przeciwległych gałęzi układu np. R_1, R_3 (lub R_2, R_4) w kierunku na współdziałanie i dwa wyjścia napięciowe AB i DC. Według teorii obwodów elektrycznych mostek ten jest uproszczonym układem czterobramowym (4P): dwa wejścia, dwa wyjścia. Sformalizowany macierzowy opis tego układu jest dość skomplikowany, nawet dla nieobciążonego czteroramiennego układu rezystancyjnego. Wystarczą tu do rozważań gotowe wzory napięć wyjściowych na obu przekątnych AB i CD tego układu. W ogólnym przypadku niejednakowych prądów $J_1 \neq J_3$, napięcia wyjściowe mostka dwuprądowego są następujące [6]:

$$U_{AB} = J_1 \frac{R_1(R_3 + R_4)}{\sum R_i} - J_3 \frac{R_3(R_1 + R_2)}{\sum R_i} \quad (1)$$

$$U''_{DC} = J_1 \frac{R_3(R_1 + R_4)}{\sum R_i} - J_3 \frac{R_1(R_3 + R_2)}{\sum R_i} \quad (2)$$

lub

$$U_{AB} = J_1 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{\sum R_i} - \frac{\Delta J (R_c + R) R}{\sum R_i} \quad (1a)$$

$$U''_{DC} = J_1 \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{\sum R_i} - \frac{\Delta J (R_1 + R_4) R_3}{\sum R_i} \quad (2a)$$

gdzie $\Delta J \equiv J_3 - J_1$.

Dla dwu jednakowych źródeł prądowych $J_1 = J_3 \equiv J$ wzory upraszczają się:

$$U_{AB} = J \frac{R_1 R_4 - R_3 R_2}{\sum R_i} \quad (3)$$

$$U''_{DC} = J \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{\sum R_i} \quad (4)$$

Dla dwu źródeł o różnych wartościach prądów $J_1 \neq J_3$, takie same wzory uzyskuje się uśredniając wskazania przy zamianie tych źródeł miejscami, a nawet, gdy użyje się tylko jedno przełączane źródło.

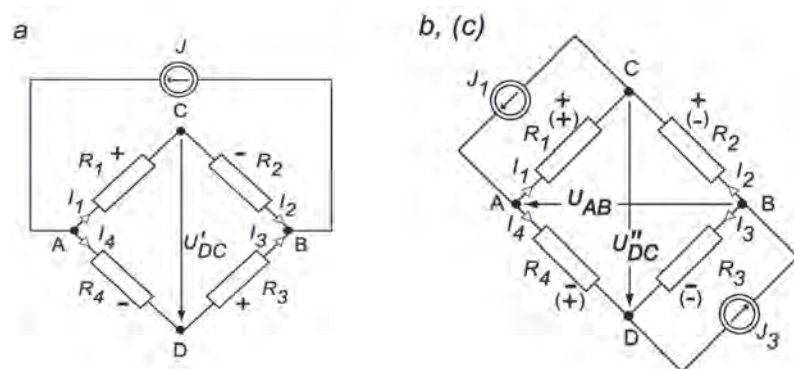
Ze wzorów (3) i (4) dla $U_{AB} = 0$ lub $U''_{DC} = 0$ wynikają bezpośrednio dwa warunki równowagi:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (3a)$$

$$R_1 R_2 = R_3 R_4 \quad (4a)$$

Obie pary iloczynów rezystancji (3a), (4a) mogą mieć różne wartości. Warunek równowagi dla każdego z wyjść mostka dwuprądowego dotyczy równości iloczynów innych par rezystancji. Jest to **równość iloczynów rezystancji ramion przyległych do końcówek danego wyjścia**. Dla wyjścia AB układu mostka 2J z rys. 1b, (c) dotyczy to rezystancji w pionie, a dla wyjścia DC – w poziomie. Z dwu wartości rezystancji regulowanej dwukrotnie dla uzyskania równowagi wyjść, można wyznaczyć dwie inne rezystancje. Oba warunki równowagi są równocześnie spełnione, gdy przeciwległe rezystancje w układzie mostka z rys. 1b(c) są sobie równe, tj. gdy $R_1 = R_3$ i $R_2 = R_4$. Warunki te nie zależą od rezystancji doprowadzeń źródeł prądowych i od jednakowych zmian względnych prądów obu źródeł. Taką samą parę warunków równowagi uzyska się dla dwu źródeł prądowych J dołączonych obocześnie do ramion CB i DA. Warunek równowagi $R_1 R_3 = R_2 R_4$ klasycznego mostka 4R, to równości iloczynów rezystancji ramion przeciwległych, ale wzory (3), (4) dla napięć wyjściowych mostka dwuprądowego mają podobną formę, jak przy jego zasilaniu prądowym (Rys. 1a), tj.

$$U'_{DC} = J \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{\sum R_i}$$



Rys. 1. Mostki rezystancyjne zasilane prądowo: układ a) mostek 4R Wheatstone’a zasilany prądowo na zaciskach AB i o wyjściu DC; b, (c) mostek dwuprądowy 2J2U – zasilany z jednakowych źródeł $J_1 = J_3$ dołączonych w AC i BD. Układ ten ma dwa wyjścia: DC – b, AB – (c). Znaki przyrostów rezystancji na rysunku (dla układu c w nawiasach) rozrównoważają mostek w tym samym kierunku Fig. 1. Current supplied resistance bridges: circuit: a – conventional bridge supplied by source J via terminals AB with output DC; b, (c) – double-current 2 J bridge supplied by two sources $J_1 = J_3$ to AC and BD terminals with 2 outputs: DC – of the circuit b; AB – of the circuit c. Given on figure signs of resistance increments (for circuit c – in brackets) unbalancing the bridge in the same direction

Układy mostków dwuprądowych można stosować też jako odchyłowe (nierównoważone). Rezystancje układu można przedstawić ogólnie jako $R_i = R_{i0} + \Delta_{Ri} = R_{i0} (1 + \varepsilon_{Ri})$, dla $i, j = (1, \dots, 4)$. Jeśli początkowe wartości R_{i0} spełniają warunki równowagi (3a), (4a), to dla przyrostów $\Delta R_i \neq 0$ na wyjściach występują napięcia:

$$U_{AB}^{\infty} = J \frac{(R_{10} + \Delta_{R1})(R_{40} + \Delta_{R4}) - (R_{20} + \Delta_{R2})(R_{30} + \Delta_{R3})}{\sum R_{i0} + \sum \Delta_{Ri}} =$$

$$= JR_{10}R_{40} \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R4} + \varepsilon_{R1}\varepsilon_{R4} - \varepsilon_{R2} - \varepsilon_{R3} - \varepsilon_{R2}\varepsilon_{R3}}{\sum R_{i0} + \sum \Delta_{Ri}} \quad (5)$$

$$U_{DC}^{\infty} = J \frac{(R_{10} + \Delta_{R1})(R_{20} + \Delta_{R2}) - (R_{30} + \Delta_{R3})(R_{40} + \Delta_{R4})}{\sum R_{i0} + \sum \Delta_{Ri}} =$$

$$= JR_{10}R_{20} \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2} + \varepsilon_{R1}\varepsilon_{R2} - \varepsilon_{R3} - \varepsilon_{R4} - \varepsilon_{R3}\varepsilon_{R4}}{\sum R_{i0} + \sum \Delta_{Ri}} \quad (6)$$

Gdy iloczyny przyrostów względnych są bardzo małe, tj. $\varepsilon_{Ri}\varepsilon_{Rj} \ll (\varepsilon_{Ri} \text{ e } \varepsilon_{Rj})$ dla $i, j \neq j$, to są one pomijalne i wzory (5), (6) upraszczają się, tj.:

$$U_{AB}^{\infty} = JR_{10}R_{40} \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R4} - \varepsilon_{R2} - \varepsilon_{R3}}{\sum R_{i0} + \sum \Delta_{Ri}} \quad (5a)$$

$$U_{DC}^{\infty} = JR_{10}R_{20} \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2} - \varepsilon_{R3} - \varepsilon_{R4}}{\sum R_{i0} + \sum \Delta_{Ri}} \quad (6a)$$

W układach zrównoważonych wystarczy by prądy źródeł były jednakowe i tylko współbieżne. W układach odchyłowych – źródła powinny być jednakowe i o stałej znanej wartości. W obu przypadkach można uśredniać wyniki po przełączeniu źródeł. Dla antysymetrycznego mostka 2J, tj. o jednakowych impedancjach w ramionach przeciwległych, równowaga obu wyjść zachodzi równocześnie. Niezrównoważony mostek dwuprądowy można więc stosować do równoczesnych pomiarów dwuparametrowych wykorzystując oba jego sygnały wyjściowe. Nie może on jednak mieć obciążonych wyjść, gdyż rezystancje w przekątnych układu niezrównoważonego wpływają na rozpyły prądów i wówczas komplikują się wzory na napięcia wyjściowe. Wynika to z równań metody potencjałów węzłowych. Mostek o obu obciążonych wyjściach jest układem czterobiegowym 4T [6] o sześciu elementach i strukturze czworoboku zupełnego. Wzory (5), (6) obowiązują więc dla każdego z wyjść tylko wtedy, gdy oba jego wyjścia napięciowe nie są obciążone. Przy nieidealnych źródłach prądowych, ich rezystancje wewnętrzne boczniują równoległe do nich rezystancje mostka, np. R_1, R_3 na rys. 1b(c) i wpływają na warunki równowagi. Trzeba we wzorach (1)–(4a) uwzględnić wartości rezystancji tych równoległych połączeń [6]. Stąd wynika wnio-

sek, że przy wykorzystywaniu równoczesnym obu wyjść należy stosować układ zasilany wymuszonymi prądami i nieobciążony na wyjściach. Wzory na napięcia wyjściowe niezrównoważonego klasycznego mostka 4R zasilanego prądowo i dla wyjść z przekątnych mostka dwuprądowego o jednakowych źródłach mają taką samą formę, a rezystancje zmieniają w nich jedynie miejsca.

Analizę teoretyczną i opisy wyników prac eksperymentalnych mostków dwuprądowych zawierają zestawione w bibliografii publikacje [3–34, 37].

3. Mostki rezystancyjne o dwu źródłach napięcia – wzory podstawowe

Z ogólnych właściwości układów elektrycznych wynika, że dla każdego układu pasywnego istnieje jego układ dualny, czyli wariantom mostka dwuprądowego odpowiadają układy mostka o dwu źródłach napięciowych. Dwie wersje układu mostka dwunapięciowego DC o dwu wyjściach napięciowych oraz prądowych podano w sekcji 3.10 monografii [6]. Ich schematy przedstawiono na rysunkach 2a, b.

Łatwiejszy do realizacji jest układ mostka dwunapięciowego (rys. 2a) o proponowanym symbolu 2E2U, tj. o źródłach E_1, E_3 i wyjściach napięciowych AB i DC. Zaś układ konduktancyjny 2E2I (rys. 2b(c)) o prądach zwarcia na wyjściach jest odpowiednikiem mostka 2J2U (rys. 1b). W literaturze poświęconej układom pomiarowym nie natrafiono na te układy. Najbliższy jest układ jednooczkowy do porównywania dwu napięć lub dwu rezystancji. Krawczyk i inni zrealizowali w Politechnice Wrocławskiej układ dwunapięciowy DC do przekazywania wartości wzorców bardzo dużych rezystancji, który nazwali mostkiem napięciowym [32]. Układ porównujący dwa indukowane równocześnie impulsy napięciowe przy obrocie cewek w dwu polach magnetycznych, autor stosował do wzorcowania teslomierzy halotronowych w dużych indukcjach magnetycznych niemierzalnych miernikami NMR [33].

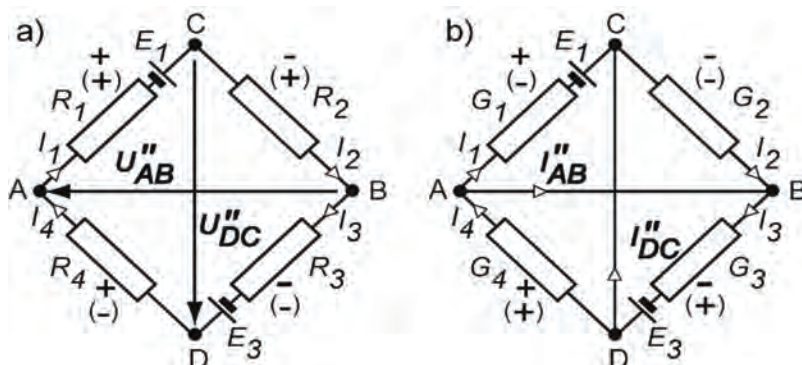
Realizacja dwu jednakowych źródeł napięcia jest łatwiejsza przy prądzie przemiennym AC. Można wówczas użyć wspólnego źródła i przekładnika lub dzielnika indukcyjnego o dwu jednakowych uzwojeniach wtórnych.

Napięcia wyjściowe układu z rys. 2a wynoszą

$$U_{AB}^{\infty} = \frac{E_3(R_1 + R_2) - E_1(R_3 + R_4)}{\sum R_i} \quad (7)$$

$$U_{DC}^{\infty} = \frac{E_3(R_1 + R_4) - E_1(R_2 + R_3)}{\sum R_i} \quad (8)$$

Dla układu z rys. 2a, gdy $U_{AB}^{\infty} = 0$ lub $U_{DC}^{\infty} = 0$ otrzymuje się dwa różne warunki równowagi:



Rys. 2. Mostki dwuwyjściowe zasilane dwoma źródłami napięcia [6] 2E – z wyjściami napięciowymi o innych zależnościach niż w mostku 2J2U, 2E2I – z wyjściami w postaci prądów zwarcia, dualny przy zmianach przewodności do dwuprądowego mostka rezystancyjnego z rys. 1b,(c) Podane znaki przyrostów rezystancji dla układu a) i konduktancji dla układu b) rozróżniają w dodatnim kierunku oba wyjścia (dla wyjścia AB znaki są w nawiasach Fig. 2. Double output bridge circuits supplied by two voltage sources: of two voltage outputs and different balance equations then of 2J bridge b) of two short current outputs dual to 2J resistance bridge of Fig. 1b,(c). Signs of resistance increments given on Fig. a, and of conductance shown on Fig. b unbalance outputs of both bridges in positive direction (for AB sign are in brackets)

$$E_3(R_1 + R_2) = E_1(R_3 + R_4), \quad (7a)$$

$$E_3(R_1 + R_4) = E_1(R_2 + R_3). \quad (8a)$$

Do równoważenia wyjść tego układu można stosować nie tylko rezystancje, ale i zmiany wartości napięć źródłowych E_1, E_2 , podobnie jak opisano to dla mostka napięciowego [32].

Jeśli napięcia źródeł w przeciwnych gałęziach układu 2E2U są sobie równe, tj. $E_1 = E_3 \equiv E$ lub wyznacza się średni wynik z dwu pomiarów przy zamianie źródeł miejscami, to zależności napięć nieobciążonych wyjść AB i DC są następujące:

$$U_{AB}^{n\infty} = E \frac{R_1 + R_2 - R_3 - R_4}{\sum R_i} \quad (9)$$

$$U_{DC}^{n\infty} = E \frac{R_1 - R_2 - R_3 + R_4}{\sum R_i} \quad (10)$$

Zaś dla $E_1 = E_2 = E$ ich warunki równowagi (7a), (8a) będą następujące:

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4 \quad (9a)$$

$$R_1 + R_4 = R_2 + R_3 \quad (10a)$$

Wzory mostków dwunapięciowych mają więc inne proste postacie niż mostków klasycznych i dwuprądowych.

Rezystancje mostka można zapisać ogólnie jako $R_i = R_{i0} + \Delta R_i$. Jeśli ich wartości początkowe R_{i0} spełniają warunek równowagi (9a) lub (10a), to przy przyrostach $\Delta R_i \neq 0$, na odpowiednim wyjściu układu są napięcia:

$$\Delta U_{AB}^{n\infty} = E \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2 - \Delta R_3 - \Delta R_4}{\sum R_{i0} + \sum \Delta R_i} \quad (11)$$

$$\Delta U_{DC}^{n\infty} = E \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4}{\sum R_{i0} + \sum \Delta R_i} \quad (12)$$

Mostkami z rys. 2a przy stałych i jednakowych napięciach źródłowych E można mierzyć dwie liniowe kombinacje przyrostów rezystancji od ich wartości w stanach równowagi.

Natomiast dla mostka 2E2J (rys. 2b) o elementach pasywnych opisanych przewodnościami ($G_1 \dots G_4$) przy $E_1 = E_3 \equiv E$ i dla rezystancji obciążeń wyjść $R_{L,CD} = 0, R_{L,AB} = 0$, otrzymuje się następujące prądy zwarcia:

$$I_{AB}^0 = E \frac{G_3 G_4 - G_1 G_2}{\sum G_i} \quad (13)$$

$$I_{DC}^0 = E \frac{G_1 G_4 - G_2 G_3}{\sum G_i} \quad (14)$$

lub dla gałęzi tego układu opisanych rezystancjami

$$I_{AB}^0 = E \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (13a)$$

$$I_{DC}^0 = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (14a)$$

Dla prądów zwarcia na wyjściach AB i DC mostka dwunapięciowego 2E (rys. 2b) wzory (13) i (14) w funkcji przewodności G_i jego elementów mają podobną formę jak wzory (1), (2) dla rezystancji mostka dwuprądowego 2J (rys. 1b). Układ z rys. 2a jest dualny do nierozpatrywanego tu przypadku mostka 2J o równoczesnych dwu wyjściach w postaci prądów zwarcia 2I.

Iloczyny w licznikach równań (13)–(14a) mostka dwunapięciowego 2E dotyczą też par jego ramion sąsiednich do zacisków wyjść, ale dla przeciwnych osi niż dla mostka dwuprądowego.

Układ 2E2J (rys. 2b) o prądach zwarcia jako sygnałach wyjściowych też można wykorzystać w pomiarach dwu wielkości, np. do pomiarów przyrostów konduktancji. Na jego wyjściach trzeba by wówczas stosować aktywne przetworniki prądu o równoległym sprzężeniu zwrotnym zapewniającym pomijalnie mały wpływ ich rezystancji wejściowych. Oba układy dwunapięciowe (rys. 2a, b) można stosować w badaniach schematów zastępczych obiektów o strukturze nierozłączalnej, ale dostępnej z zacisków, ale wymagają one rozłączalnych dwu gałęzi ze źródłami napięciowymi. W tych gałęziach i w obwodach o prądach zwarcia jako sygnałów wyjściowych (rys. 2b) może wystąpić też wpływ rezystancji doprowadzeń. Jako układy współpracujące z wyjściami obu mostków (rys. 2a, b) warto stosować układy aktywne o odpowiedniej dla nich rezystancji wejściowej ($\gg R_{wy}, 0$).

4. Pętla prądowa Andersona

W pomiarach wieloparametrowych stosuje się też wyspecjalizowane układy pomiarowe z podzespołami aktywnymi. Przykładem jest tzw. prądowa pętla Andersona (rys. 3) [1].

Pętlę tę omawia się tu dlatego, że zastosowane w niej dwuwejściowe wzmacniacze do porównywania przyrostów napięć jednakowych czujników rezystancyjnych temperatury można użyć na wyjściach mostków dwuzródłowych.

Pętlą Andersona mierzy się analogowo przyrosty napięć jednakowych czujników rezystancyjnych szeregowo połączonych, a więc przy tym samym prądzie. Sygnały wyjściowe ze wzmacniaczy operacyjnych DDSi mierzących te różnice można przetwarzać dalej analogowo i cyfrowo. Trzeba jednak spełnić kilka dodatkowych wymagań:

- rezystancje początkowe czujników takie same jak rezystancja odniesienia,
- zasilanie czujników wspólnym prądem ograniczonym najmniejszą dopuszczalną ich mocą,
- rozłączanie czujników połączonych np. w mostek co najmniej w jednym punkcie,
- konieczność użycia aż 6–7 przewodów doprowadzających oraz
- wielu pomiarowych wzmacniaczy różnicowych o „pływających” wejściach.

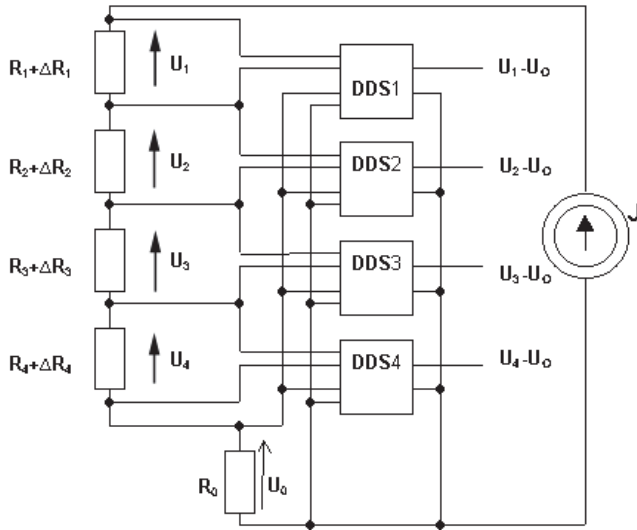
Jeśli wynik zależy od bardzo małej różnicy mierzonych dwu dużych napięć, to może być bardzo niedokładny, a błędów nie ma jak wyeliminować na bieżąco i w prosty sposób. Przy takich pomiarach jednoparametrowych mostki klasyczne mają nadal szereg znanych zalet w stosunku do bezpośrednich pomiarów obu napięć, w tym dużą stabilność zera opartą na stabilności elementów pasywnych.

Dla małych względnych przyrostów rezystancji realizują one na bieżąco sygnał zależny liniowo od sumy i różnicy tych przyrostów. Powszechnie stosuje się je na wejściach przetworników i komputerowych systemów pomiarowych. Dla większych przyrostów immitancji pojawiają się nieliniowości sygnału wyjściowego. Ich wpływ można eliminować przez odpowiedni dobór elementów w mostku, sprzężenie zwrotne lub korekcję w przetwarzaniu sygnału po stronie cyfrowej.

5. Zastosowanie układów dwuzródłowych w pomiarach dwu rezystancji i ich przyrostów

5.1. Pomiary pośrednie dwu wielkości (2D) czujnikami różnicowymi

Wpływy kilku wielkości oddziałujących równocześnie na parametry obiektu mierzonych bezpośrednio lub za pomocą czujników



Rys. 3. Prądowa pętla Andersona (NASA) [1]: DDSi – dwuwejściowe układy różnicowe mierzące przyrosty napięć czujników zasilanych wspólnym prądem J

Fig. 3. Current Anderson loop [1]: DDSi – double inputs differential circuits measuring the voltage increments of sensors supplied by the same current J

są opisywane funkcjami zarówno liniowymi, jak i nieliniowymi. Zwykle uzyskuje się sygnały powiązane ze sobą i zależne od kilku wielkości, które następnie przetwarzają się analogowo i cyfrowo według określonych algorytmów. Aby przybliżyć to zagadnienie, rozpatrzmy zasadę pomiarów w dość prostej sytuacji, gdy każdy z niewielkich przyrostów $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ mierzonych parametrów ma takie dwie składowe, z których każda zależy tylko od jednej wielkości wpływającej x_1 lub x_2 [6]. Wówczas:

$$\varepsilon_1(x_1, x_2) = \varepsilon'_1(x_1) + \varepsilon''_1(x_2) \quad (15a)$$

$$\varepsilon_2(x_1, x_2) = \varepsilon'_2(x_1) + \varepsilon''_2(x_2) \quad (15b)$$

Po prawej stronie układu równań (15a, b) występują aż cztery różne składowe. Znalezienie x_1, x_2 będzie więc wtedy możliwe, gdy składowe te będą powiązane jeszcze dwoma innymi znanymi zależnościami. Na przykład, gdy zależności te są liniowe, czyli

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon'_1(x_1) \\ \varepsilon''_1(x_2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

lub w postaci rozwiniętej dla składowych obu przyrostów:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_1(x_1) &= k_{11}\varepsilon'_1(x_1); & \varepsilon''_1(x_2) &= k_{12}\varepsilon''_1(x_2); \\ \varepsilon'_2(x_1) &= k_{21}\varepsilon'_1(x_1); & \varepsilon''_2(x_2) &= k_{22}\varepsilon''_1(x_2); \end{aligned} \quad (16a-d)$$

Przekształcenie odwrotne zależności (16) jest następujące:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon'_1(x_1) \\ \varepsilon''_1(x_2) \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \begin{bmatrix} k_{22} & -k_{21} \\ -k_{12} & k_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Przyrosty cząstkowe $\varepsilon'_1(x_1)$ oraz $\varepsilon''_1(x_2)$ składowych mogą być zarówno liniowymi, jak i nieliniowymi funkcjami przyrostów x_1 oraz x_2 wielkości mierzonych. Przy różnych wartościach współczynników k_{ij} układ równań (15a, b) dla przyrostów względnych opisuje zarówno liniowe zależności zmian parametrów układu od wpływających wielkości (dodawanie, odejmowanie z różnymi współczynnikami), jak i niektóre nieliniowe, gdyż suma niezbyt dużych przyrostów względnych kilku wielkości odzwierciedla mnożenie tych wielkości, a różnica – ich dzielenie.

Rozpatrzmy szczególnie przypadek czujnika różnicowego o dwu jednakowych elementach, gdy wielkość x_1 jednakowo wpływa na oba ich przyrosty $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, zaś wpływy wielkości x_2 są o tej samej wartości, lecz przeciwnego znaku, czyli: $k_{11} = k_{21} = k_{22} = +1, k_{12} = -1$ oraz

$$\varepsilon'_1(x_1) = \varepsilon'_2(x_1) \equiv \varepsilon', \quad \varepsilon''_2(x_2) = -\varepsilon''_1(x_2) \equiv \varepsilon'' \quad (18a)$$

wówczas

$$\varepsilon' = 0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad \text{oraz} \quad \varepsilon'' = 0,5(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (18b)$$

Dla wszystkich powyższych rodzajów pracy czujników, po znalezieniu przyrostów $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ można wyznaczyć ich składowe $\varepsilon'_1(x_1), \varepsilon''_1(x_2)$, a z nich przyrosty x_1, x_2 obu wielkości mierzonych.

Pomiary przyrostów dwu lub więcej parametrów i odtwarzanie wielkości mierzonych na podstawie omówionych zależności można przeprowadzać w różnych układach pomiarowych i różnicowych i sumujących. Na przykład dla modeli obiektów i czujników rezystancyjnych istnieje kilka możliwości pomiarów przyrostów rezystancji. Rezystancje podlegające zmianom można np. wraz ze stałą rezystancją odniesienia połączyć szeregowo, zasilić stabilizowanym prądem oraz bardzo precyzyjnie mierzyć cyfrowo, zapamiętywać i odpowiednio dalej przetwarzać wszystkie kolejne spadki napięć. Przy dwu tylko rezystancjach zmiennych, dla uzyskania pojedynczego wyniku trzeba wykorzystać co najmniej sześć pomiarów w tym trzech dla stanu początkowego. Liczba pomiarów i przetworzeń przyrasta wraz z każdą dodatkową zmienną rezystancją. Nie jest to wygodna metoda nawet przy jej automatyzacji, szczególnie w pomiarach dynamicznych przy szybko zmieniających się wielkościach i nadaje się do stosowania raczej tylko w warunkach laboratoryjnych.

Jeśli wynik zależy od bardzo małej różnicy mierzonych dwu napięć, to może on być niedokładny, a błędów nie można na bieżąco i w prosty sposób wyeliminować. Wówczas przy pomiarach jednoparametrowych mostki klasyczne mają nadal szereg znanych zalet w stosunku do bezpośrednich pomiarów obu napięć, w tym bardzo dużą stabilność zera opartą na stabilności elementów pasywnych. Dla małych przyrostów względnych rezystancji mostki realizują sygnał wyjściowy zależny liniowo od sumy lub różnicy tych przyrostów. Są powszechnie stosowane na wejściach przemysłowych przetworników i komputerowych systemów pomiarowych. Przy większych przyrostach imitancji pojawiają się nieliniowości sygnału wyjściowego, ale ich wpływ eliminuje się przez odpowiedni dobór elementów mostka, sprzężenie zwrotne [6] lub korekcję w cyfrowym przetwarzaniu sygnału.

Klasyczne mostki odchyłowe są jednowyjściowe i mają tylko pojedynczy ciągły sygnał wyjściowy. Autor zaproponował układy o dwu wyjściach [3–9], w tym mostki o niekonwencjonalnie dołączonych dwu źródłach prądowych oraz dwu napięciowych. Układy te przy prądzie stałym (DC) pozwalają uzyskiwać równocześnie dwa sygnały różnie zależne od przyrostów rezystancji ramion mostka w stanach równowagi.

5.2. Przykład pomiaru naprężenia i temperatury dwutensometrycznym czujnikiem różnicowym

W pomiarach tensometrycznych siły lub ciśnienia stosuje się 2 lub 4 jednakowe tensometry tak umieszczone na konstrukcji podlegającej odkształceniu, że tworzą one jeden lub dwa czujniki różnicowe dwuelementowe. Jeden z pary tensometrów podlega rozciąganiu, a drugi ściskaniu. Przyrosty rezystancji takiej pary tensometrów są o zbliżonej wartości, ale o przeciwnych znakach. Rezystancje tensometrów zależą też od ich temperatury jako wypadkowej temperatury otoczenia i grzania własnego przepływającym przez nie prądem. Dla takiego czujnika różnicowego, można założyć, że znamionowe rezystancje początkowe obu tensometrów i czułości dla odkształcenia oraz dla przyrostów

temperatury są takie same dla każdego z nich. Jeśli elementy czujnika różnicowego umieszcza się w sąsiednich ramionach, np. 1, 2 omówionych układów mostków dwuzródłowych zrównoważonych w określonej temperaturze odniesienia T_0 i dla określonej początkowej wartości mierzonego naprężenia ε_0 , np. równej zeru, to na ich wyjściach pojawiają się sygnały od sumy i różnicy przyrostów obu elementów – wzory (18a, b). Otrzymuje się

$$R_1(\sigma, \Delta T) = R_{10}(1 + \varepsilon_{R1}) = R_{10}(1 + \varepsilon_\sigma)(1 + \varepsilon_{\Delta T}),$$

$$R_2(\sigma, \Delta T) = R_{20}(1 + \varepsilon_{R2}) = R_{10}(1 - \varepsilon_\sigma)(1 + \varepsilon_{\Delta T}),$$

$$\varepsilon_{R1} = \varepsilon_\sigma + \varepsilon_{\Delta T} + \varepsilon_\sigma \varepsilon_{\Delta T},$$

$$\varepsilon_{R2} = -\varepsilon_\sigma + \varepsilon_{\Delta T} - \varepsilon_\sigma \varepsilon_{\Delta T}.$$

Dla mostka dwuprądowego 2J o jednakowych rezystancjach $R_3 = R_4 = R_{10}$ z (5) i (6) wynika:

$$U_{AB}^{n\infty} = JR_{10} \frac{\varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2}}{4 + \varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}} = JR_{10} \frac{2\varepsilon_\sigma(1 + \varepsilon_{\Delta T})}{4 + 2\varepsilon_{\Delta T}} \approx JR_{10} \frac{\varepsilon_\sigma}{2 + \varepsilon_{\Delta T}} \quad (19)$$

$$U_{DC}^{n\infty} = JR_{10} \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2} + \varepsilon_{R1}\varepsilon_{R2}}{4 + \varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}} =$$

$$= JR_{10} \frac{2\varepsilon_{\Delta T} + (\varepsilon_{\Delta T})^2 - (\varepsilon_\sigma(1 + \varepsilon_{\Delta T}))^2}{4 + 2\varepsilon_{\Delta T}} \approx JR_{10} \frac{\varepsilon_{\Delta T}}{2 + \varepsilon_{\Delta T}} \quad (20)$$

Przybliżenia polegają na pominięciu wyrazów stanowiących iloczynny małych przyrostów rezystancji.

Dla mostka dwunapięciowego o symbolu 2E2U, gdy $R_3 = R_4 = R_{10}$ z (9)–(12) otrzymuje się odpowiednio

$$\Delta U_{AB}^{n\infty} = E \frac{\varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}}{4 + \varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}} = E \frac{\varepsilon_{\Delta T}}{2 + \varepsilon_{\Delta T}} \quad (21)$$

$$\Delta U_{DC}^{n\infty} = E \frac{\varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2}}{4 + \varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}} = E \frac{\varepsilon_\sigma}{2 + \varepsilon_{\Delta T}} \quad (22)$$

Wzory te są proste i podobne do (5a), (6a) dla małych przyrostów rezystancji w mostku dwuprądowym 2J.

Dwa źródła napięciowe $E_1 = E_3 = E$ w układzie mostków dwunapięciowych, jeśli są realizowane elektronicznie, to powinny mieć obwody zasilające DC izolowane od siebie. Łatwiej jest to uzyskać przy prądzie przemiennym AC, np. stosując dwa jednakowe uzwojenia wtórne w przekładniku napięciowym lub dzielniku indukcyjnym i uzwojenie pierwotne zasilane z jednego źródła AC, stabilizowanego dla pracy jako mostka odchyłowego.

6. Stan i propozycje kierunków badań dwuzródłowych układów mostkowych i ich zastosowań

Mostki z dwoma źródłami do równoczesnych pomiarów dwu wielkości to nowy rodzaj układów pomiarowych. Autor opublikował ideę mostków dwuprądowych początkowo pod nazwą antymostki w 2000 r. [3] i omawiał je w latach następnych [4–10]. Ich podstawy teoretyczne rozwinął szczegółowo w monografii [6]. Rozpatrzył w niej m.in. kilka wariantów struktury mostków dwuzródłowych prądu stałego DC, prądu przemiennego AC, mostek kaskadowy (mostek w mostku) [6, 8] oraz podał mostki o dwu źródłach napięciowych [6]. Idea tego nowego rodzaju mostków wynikała z wcześniejszych prac

eksperymentalnych, tj. z badań zmian parametrów schematu zastępczego hallotronów czterokońcówkowych (4T). Część odwracalna tego schematu ma strukturę czworoboku zupełnego z przecinającymi się przekątnymi o gałęziach zależnych równocześnie w różny sposób od wielkości wpływających indukcyjnej magnetycznej B i temperatury. Autor znalazł równoważne temu czworobokowi struktury płaskie i dzięki nim opracował nowe układy do niezależnej od zmian temperatury kompensacji napięcia asymetrii hallotronów (czyli ich napięcia początkowego tylko od prądu hallotronu przy indukcji magnetycznej $B = 0$) [2]. Zaproponował też układ dwuprądowy zasilany z hallotronem o wyjściu włączonym w mostek rezystancyjny, w którym uzyskuje się regulowaną nieliniową charakterystykę napięcia w funkcji indukcji magnetycznej [13].

Autonomiczny układ mostka dwuprądowego 2J2U prądu stałego (DC) zbudował, zbadał i zweryfikował w ramach rozprawy doktorskiej Adam Idźkowski, obecnie prof. Politechniki Białostockiej. Wraz z dr. Jarosławem Makalem, obecnie profesorem tej uczelni i przy konsultacjach autora [10] sprawdzili oni różne zastosowania układu mostka dwuprądowego do pomiarów dwuparametrowych, w tym użycie w laboratoryjnym stanowisku do pomiaru momentu ugięcia belki i jej temperatury za pomocą dwu tensometrów tej uczelni. Następnie A. Idźkowski i dr Wojciech Walendziuk przy współpracy z autorem [10–26] zbudowali, zbadali i opisali kilka modeli przyrządów pomiarowych wykorzystujących układ mostka dwuprądowego DC. Wyniki tych badań i zbudowane modele przedstawione są w publikacjach [23–26, 29–31]. Zgłosili też dwa patenty [34, 35].

Wszystkie te prace zweryfikowały pozytywnie podana przez autora ideę dwuprądowych mostków DC i ich podstawy teoretyczne opisane w monografii [6] i w innych publikacjach własnych i wspólnych [3–28]. Utrudnienia w konstrukcji elektronicznego układu pomiarowego mostków dwuzródłowych DC wynikają z braku wspólnej masy dla obu źródeł prądowych, chociaż w stanach równowagi jedna z końcówek każdego z nich ma wspólny potencjał. W konstrukcjach prototypowych stosowano też komercyjne scalone źródła prądowe. Próbowano kształtować potencjały układu poprzez rezystancję szeregową ze źródłami prądowymi, ale nie uzyskano wystarczająco stabilnych wyników.

W konstrukcjach profesjonalnych układy aktywne tworzące źródła prądowe, lub napięciowe, powinny mieć dwa odizolowane obwody zasilacza. Napięcia wyjściowe należy mierzyć bez obciążania wyjść, w tym stosując układy różnicowe ze wzmacniaczami operacyjnymi o pływających wejściach, tj. podobnie jak są użyte w pętli Andersona [1]. Napięcia wyjściowe można wtedy przetwarzać dalej, analogowo i cyfrowo, wg przyjętych algorytmów.

Natomiast mostki dwuprądowe prądu przemiennego AC, po niemal 20 latach od omówienia kilku ich przykładów w monografii [6], nie są jeszcze zweryfikowane eksperymentalnie. Jedną z przyczyn jest rezygnacja jednego z pracowników tej uczelni z kontynuacji częściowo zaawansowanej habilitacji (wybrał nową możliwość kariery profesora dydaktycznego, zapewne jako korzystniejszą też dla uczelni). Mostki DC i AC z dwoma źródłami napięciowymi też nie mają jeszcze takiej weryfikacji. Wspomniano już, że przy prądzie przemiennym AC realizacja ich wydaje się prostsza niż źródeł dwuprądowych. Można je stworzyć używając przekładnika napięciowego lub dzielnika indukcyjnościowego o dwu jednakowych uzwojeniach wtórnych, dołączonego po stronie pierwotnej do stabilnego źródła napięcia.

Budowa i badania mostków dwuzródłowych jest propozycja oryginalnego i niekonwencjonalnego kierunku badań teoretycznych i eksperymentalnych w dziedzinie nowych rozwiązań autonomicznych układów pomiarowych i układów wejściowych systemów pomiarowych. Autor zachęca dotychczasowych wykonawców do kontynuowania prac oraz namawia też wszystkie inne osoby zainteresowane rozwojem techniki pomiarowej do podjęcia tej obszernej tematyki, gdyż jest ona zarówno atrakcyjna naukowo, jak i ukierunkowana wdrożeniowo.

Bibliografia

- Anderson K.F., *The New Current Loop: An Instrumentation and Measurement Circuit Topology*. "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", Vol. 46, No. 5, 1997, 1061–1067, DOI: 10.1109/19.676711.
- Kobus A., Tuszyński J., Warsza Z.L., *Technika hallotronowa*, WNT Warszawa 1980.
- Warsza Z., *Antymostki – nowy rodzaj układów do pomiaru impedancji*. Mat. Konf.: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle. Politechnika Zielonogórska, 2000, 233–240.
- Warsza Z.L., *Pomiary impedancji układami mostkowymi o dwuprądowym zasilaniu*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 5, Nr 5, 2001, 17–21.
- Warsza Z.L., *Bridges Supplied by Two Current Sources – New Tool for Impedance Measurements and Signal Conditioning*, IMEKO-TC7 Symposium, Kraków, 2002, 231–36.
- Warsza Z.L., *Immitancyjne układy czterobiegunowe (4T) w pomiarach wieloparametrowych*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa 2004.
- Warsza Z.L., *Two Parameter (2D) Measurements in Four Terminal (4T) Impedance Bridges as the New Tool for Signal Conditioning*, 14th International Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation 10th Workshop on ADC Modeling and Testing IMEKO TC-4, Gdynia, Jurata, Sept. 2005, Vol. 1. Part 1. Main Equations and Terminal Parameters, 31–36. Part 2. Measurements of Two Variables (2D), 37–42.
- Warsza Z.L., *Backgrounds of two variable (2D) measurements of resistance increments by the bridge cascade circuit*. SPIE Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Vol. 6347, 2006, red. Romaniuk R.S., DOI: 10.1117/12.714768.
- Warsza Z.L., *Two Parameter (2D) Measurements in Double-Current Supply Four-terminal Resistance Circuits*. "Metrology and Measurement Systems". PAN Vol. XIII, No. 1, 2006, 49–65.
- Idźkowski A., Makal J., Warsza Z.L., *Application of Double Current Bridge-Circuit for Simultaneous Measurements of Strain and Temperature*. Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC IEEE 2007 Warsaw, Poland, DOI: 10.1109/IMTC.2007.379259.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., Makal J., *Experimental verification of the double-current supplied bridge circuit in 2D measurements of strain and temperature*, 15th IMEKO TC-4 International Symposium on Novelties in electrical measurements and instrumentation, Vol. 1, 2007, 127–131.
- Idźkowski A., Makal J., *Mostek zasilany dwuprądowo – eksperyment symulacyjny*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 8, Nr 7-8, 2004, 61–65.
- Warsza Z., *Hallotron jako czwórnik sterowany polem magnetycznym*. „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 83, Nr 1, 2007, 57–64.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., Makal J., *Zastosowanie mostka dwuprądowego do jednoczesnego pomiaru odkształcenia mechanicznego i temperatury*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, R. 53, Nr 9 bis, 2007, 470–473.
- Idźkowski A., Makal J., *Realizacja układu pomiarowego z czujnikami tensometrycznymi w mostku z przelączanym źródłem prądowym*, „Elektronika – konstrukcje, technologia, zastosowania”, Vol. 49, Nr 6, 2008, 159–161.
- Makal J., Idźkowski A., Warsza Z.L., *Ocena dokładności nowego rodzaju mostka z czujnikiem tensometrycznym do pomiarów dwuparametrowych*, „Pomiary, Automatyka, Komputery w Gospodarce i Ochronie Środowiska, Nr 1, 2010, 21–23.
- Idźkowski A., Makal J., Warsza Z.L., *Simultaneous Measurements of Two Parameters by Double Current Supplied Bridge*. "Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems", Vol. 6, No. 2, 2012, 26–31.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., *Unconventional Double-Output Bridge for Simultaneous Measurement of Two Parameters*. "Systemy Obrobki Informatycznej", Vipusk 1(99) Kharkiv 2012, 59–64.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., *Analiza błędów granicznych i niepewności mostków sensorowych jako przetworników rezystancji na napięcie*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, T. 59, Nr 6, 2013, 548–553.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., Walendziuk W., *The parameters of unconventional double-current circuit, their accuracy measures and measurement of strain and temperature*. "International Journal of Electronics and Telecommunications", Vol. 60, No 4, 2014, 327–330. DOI: 10.2478/eletel-2014-0043.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., *Opisy dokładności układu oczka 4R zasilanego klasycznie oraz dwuprądowo jako przetwornika rezystancji w pomiarach dwuparametrowych (2D)*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 60, Nr 11, 2014, 1002–1005.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., *Relations of limited errors and uncertainties type B of the bridge as conditioner circuit for sensors of broadly variable resistances*, "Przegląd Elektrotechniczny", Vol. 90, No. 12, 2014, 83–86, DOI: 10.12915/pe.2014.12.1.
- Idźkowski A., Świętochowski P., Warsza Z.L., Walendziuk W., *Unconventional Double R/U Converter for Measurement of Two Quantities by a Single Differential Sensor*. Proceedings. of Conf. Automation 2015 Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. (Editors: R. Szweczyk, C. Zieliński, M. Kaliczynska), Vol. 352, 2015, 83–90, DOI: 10.1007/978-3-319-15835-8_10.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., *Accuracy analysis of the 2D resistance-to-voltage converters for resistive sensors*, "Measurement Automation Monitoring", Vol. 61, No. 10, 2015, 460–464.
- Idźkowski A., Walendziuk W., Warsza Z.L., *Unconventional Double-Current Circuit for Deflection and Temperature Simultaneous Measurement*. "Elektronika ir elektrotehnika", Vol. 15, No. 1, 2015, 23–27, DOI: 10.5755/j01.eee.21.1.6834.
- Idźkowski A., Walendziuk W., Świętochowski P., Warsza Z., *Metrological Properties of a Two-Output Transducer for Measuring Sum and Difference of Small Resistances*. "Elektronika ir elektrotehnika", Vol. 23, No. 5, 2017, 41–45, DOI: 10.5755/j01.eie.23.5.19268.
- Warsza Z.L., Idźkowski A., *Uncertainty Analysis of the Two-Output RTD Circuits on the Example of Difference and Average Temperature Measurements*, Mechatronics 2017 – Ideas for Industrial Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 934, 2019, 435–446, DOI: 10.1007/978-3-030-15857-6_43.
- Idźkowski A., Warsza Z., *Temperature difference measurement with using two RTD sensors as example of evaluating uncertainty of a vector output quantity*, "Robotic Systems and Applications", Vol. 1, No. 2, 2021, 53–58.
- Walendziuk W., Gołębiowski J., Idźkowski A., *Comparative Evaluation of the Two Current Source Supplied Strain Gauge Bridge*, "Elektronika ir elektrotehnika", Vol. 22, No. 6, 2016, 33–38, DOI: 10.5755/j01.eie.22.6.17220.
- Idźkowski A., Gołębiowski J., Walendziuk W., *Analysis and application of two-current-source circuit as a signal conditioner for resistive sensors*, "Journal of Electrical Engineering", Vol. 68, No. 3, 2017, 200–205, DOI: 10.1515/jee-2017-0029.
- Walendziuk W., Idźkowski A., *Calibration procedure and uncertainty analysis of an electronic scale based on two-cur-*

- rent source supplied circuit, "Tehnički Vjesnik", Vol. 24, suppl. 1, 2017, 93–97, DOI: 10.17559/TV-20141026162349.
32. Krawczyk K., Lisowski M., Kocjan B., *Dwutorowy system trasabilności rezystorów wzorcowych w zakresie 10 kΩ – 100 TΩ*. „Metrologia. Badania i zastosowania”, red. J. Augustyn, Politechnika Świętokrzyska Kielce, 2022, 110–121.
33. Warsza Z.L., Żyła B., *Miernik ilorazu indukcji magnetycznych*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, 1966, 8/9.
35. Wojciech Walendziuk, Adam Idźkowski, P.395194, patent udzielony, numer prawa wyłącznego 221900, „Układ elektryczny do sekwencyjnego pomiaru czterech różnic lub sum przyrostów rezystancji”, zakres terytorialny ochrony patentowej: Polska, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, zgłoszono 2011, udzielono 2016.

Patenty PL

34. Wojciech Walendziuk, Adam Idźkowski, P.394350, patent udzielony, numer prawa wyłącznego 220087, „Układ z dwoma źródłami prądowymi do jednoczesnego pomiaru dwóch różnic przyrostów rezystancji”, zakres terytorialny ochrony patentowej: Polska, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, zgłoszenie 2011, udzielono 2015.

Two-source Bridges as a New Kind of Measuring Systems

Abstract: The paper discusses the basic relationships and the state of research on a new type of bridge measurement systems with two outputs from both diagonals of a four-arm bridge. Their measuring circuits contain either two current sources or two voltage sources respectively unconventionally connected to opposite branches of these circuits. With direct current (DC), these bridges, after balancing the outputs of each of the diagonals, will enable measurements of two resistances (or two conductances) of their arms. As deflection bridges - they measure simultaneously increments of these resistances from balanced states in diagonals. The formulas for the voltages of both outputs of the systems and the balance conditions for each of them are given. As an example of application, the simultaneous measurement of stress and temperature increase with a differential two-element strain gauge was considered. The current state of theoretical work and the results of several experimental constructions of measuring instruments with a two-current bridge are briefly characterized.

Keywords: two-current and two-voltage bridges, simultaneously measurements of two resistances and of their increments

doc. dr inż. Zygmunt Lech Warszawa

zlw1936@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3537-6134



Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej 1959, doktorat 1967, docent od 1970. Praca: Instytut Elektrotechniki 1958–1963 i 1994–1995, Politechnika Warszawska 1960–1970, Politechnika Świętokrzyska 1970–1978 (organizator i dziekan Wydziału Transportu w Radomiu), Organizator i kierownik: Ośrodka Aparatury Pomiarowej w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej 1978–1982 oraz Zakładu Automatykacji i Pomiarów w Instytucie Chemii Przemysłowej 1983–1992. Doradca Ministra Edukacji Narodowej 1992–1995, Politechnika Radomska 1983–2002. Obecnie główny specjalista w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Autor ponad 340 publikacji, 6 monografii, kilkudziesięciu prac badawczych i konstrukcyjnych, 11 patentów oraz promotor 2 doktorów. Prezes Polskiego Towarzystwa Metrologicznego. Członek stowarzyszenia PolSPAR oraz Akademii Metrologii Ukrainy.