

Bolesław TYNC¹, Tadeusz SKUBIS²¹ ZAKŁAD ELEKTRONICZNEJ APARATURY POMIAROWEJ „TYBO”, B.TYNC² POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI**Analogowo-cyfrowe zrównoważone mostki prądu stałego****Mgr inż. Bolesław TYNC**

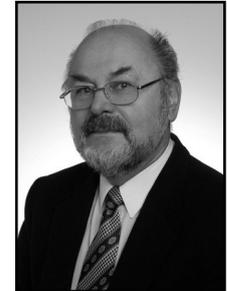
W 1986 roku opracował, opatentował i wdrożył pierwszy mostek równoważony ładunkowo. W 1990 roku założył Zakład Elektronicznej Aparatury Pomiarowej TYBO, w którym prowadzi badania i wdrożenia kolejnych mostków analogowo-cyfrowych. Za wynalazki i produkty wyróżniony w kraju i za granicą. Od 2002 roku współpracuje z IMEiA Politechniki Śląskiej w zakresie naukowego opracowania mostków tybo.

e-mail: tync@tybo.pl

**Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS**

Dyrektor Instytutu Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Zajmuje się dydaktyką i badaniami naukowymi w obszarze metrologii, zwłaszcza dokładnymi elektronicznymi układami pomiarowymi impedancji, teorią pomiaru oraz kompatybilnością elektromagnetyczną. Autor licznych publikacji o tematyce metrologicznej. Prowadzi aktywną współpracę z metrologicznymi ośrodkami krajowymi i zagranicznymi. Członek Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.

e-mail: tadeusz.skubis@polsl.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono nową klasę mostkowych układów pomiarowych prądu stałego. Układy te mają właściwości charakterystyczne dla mostków zrównoważonych (m. in. wartości chwilowe napięcia na przekątnej pomiarowej są równe 0). Sygnał wyjściowy w postaci cyfrowej (częstotliwość lub liczba impulsów) uzyskuje się bez zastosowania dodatkowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Ze względu na sposób równoważenia, nazwano je mostkami równoważonymi ładunkowo.

Wykazano zgodność omawianego układu z definicją *mostkowego układu pomiarowego* Karandiejewa. Analiza i opis mostków równoważonych ładunkowo wymagały wprowadzenia nowych pojęć, ponieważ pojęcia stosowane w opisie mostków klasycznych okazały się niewystarczające. Przy użyciu nowych pojęć uogólniono definicję *miarów mostkowych* podaną dla mostka Wheatstone'a. Uogólniona definicja uwzględniła specyfikę równoważenia ładunkowego mostków rezystancyjnych, ale nadal obowiązuje dla mostka (prądu stałego) Wheatstone'a.

Słowa kluczowe: pomiar rezystancji, zrównoważony mostek prądu stałego, bezpośrednia konwersja rezystancji na sygnał cyfrowy.

A/D Balanced DC Resistance Bridges**Abstract**

New class of resistance measurement circuits is presented in the paper. The circuits can be regarded as DC bridges, because they have all features of classical balanced resistance bridge (among others zero voltage value across the diagonal of the bridge). Additionally digital output signal (frequency or pulse number) is accessible, without use of the ADC. For the new circuit the name "charge balanced bridge" there is proposed. In the paper there is shown the conformity of the new circuit with the classic definition of the DC bridge circuit, given e.g. by Karandeev. New terms are introduced for the analysis and description of charge balanced bridges, and the definition of bridge measurement was generalized. The new definition includes the classic Wheatstone bridge, as well as charge balanced bridges.

Keywords: resistance measurements, DC resistance bridge, direct A/D resistance conversion

1. Wstęp

Pomiar rezystancji mostkiem zrównoważonym należy do klasycznych zadań metrologii elektrycznej, jest dobrze znany i często stosowany. Sądzono, że od strony teoretycznej jest to zagadnienie zamknięte, w pełni opisane w starszej literaturze [1]. Tematyka doskonalenia mostkowego pomiaru rezystancji nie była ostatnio podejmowana. Po kilkudziesięciu latach przerwy podjęto

analizę mostków zrównoważonych pod kątem możliwości wykorzystania ich w cyfrowej technice pomiarowej.

W celu odpowiedniego zakwalifikowania nowej klasy układów, przeanalizowano definicje różnych układów pomiarowych. Jako punkt odniesienia przyjęto powszechnie uznawaną w środowisku metrologów definicję mostkowego układu pomiarowego sformułowaną przez Karandiejewa [1].

Konstruując model analogowo-cyfrowego zrównoważonego mostka rezystancyjnego odniesiono się do znanej analizy mostka Wheatstone'a. Mostek ten jest układem znanym i opisywanym za pomocą małej ilości pojęć. Rozszerzenie klasy mostków zrównoważonych o mostki analogowo-cyfrowe wymagało wprowadzenia nowych pojęć (p. 3, 4, 5):

- *Proporcja nastaw rezystancji* – upraszcza zapis równań opisujących warunki równowagi, zarówno w mostku Wheatstone'a jak i w mostkach analogowo-cyfrowych, oraz ułatwia porównanie tych dwóch różnych klas układów mostkowych.

- *Funkcje odczytu oraz wielkości odczytywane* – pomagają w opisie procedury wyznaczania wyniku pomiaru w mostku zrównoważonym. Z warunku równowagi, dla znanych wartości *wielkości odczytywanych*, wyliczany jest wynik pomiaru, czyli wartość rezystancji mierzonej. W mostkach równoważonych ładunkowo *wielkościami odczytanymi* mogą być: czas, częstotliwość lub liczba impulsów.

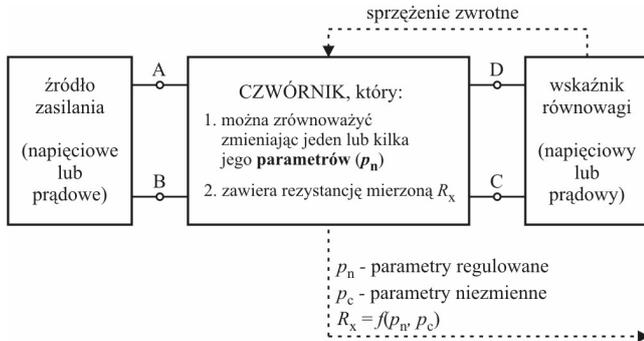
- *Współczynnik kluczowania, nastawa współczynnika kluczowania, proporcja nastaw czasów, parametr kluczowania* – są to pojęcia, które pozwalają nazwać i określić istotne parametry sterowania kluczami przełączającymi rezystancje w mostku równoważonym ładunkowo.

- *Magazyn ładunku* – jest istotnym elementem mostka analogowo-cyfrowego (nie występującym w klasycznych układach mostkowych), uwzględnianym w opisie i analizie mostków równoważonych ładunkowo.

2. Definicja zrównoważonego mostka pomiarowego

W [1] podana jest następująca ogólna definicja mostka pomiarowego: „*Mostkowym układem pomiarowym lub po prostu mostkiem nazywa się czwórnik, w którym do jednej pary zacisków przyłącza się napięcie zasilające (prąd zasilający), a do drugiej wskaźnik równowagi (czuły wskaźnik prądu lub napięcia). Jedną z gałęzi mostka zawiera mierzoną rezystancję. Układ połączeń czwornika jest taki, że przez zmianę jednego lub kilku jego parametrów można osiągnąć równowagę (doprowadzić do zaniku napięcia na wyjściu czwornika, tzn. na zaciskach wskaźnika)*”.

Z definicji tej wynika, że równoważenie mostka przez zmianę jednego lub kilku jego parametrów (rys. 1) odbywa się na podstawie stanu wskaźnika równowagi. Występuje tutaj sprzężenie zwrotne, pomiędzy wskazaniem wskaźnika równowagi, a regulowanymi parametrami czwórnika, które realizowane jest przez operatora (w mostku równoważonym ręcznie) lub przez układ automatycznej regulacji (w mostku automatycznym). Stanowi równowagi mostka odpowiadająca określona wartość parametru regulowanego (p_n). Tę wartość nazwano dalej *nastawą* parametru regulowanego.

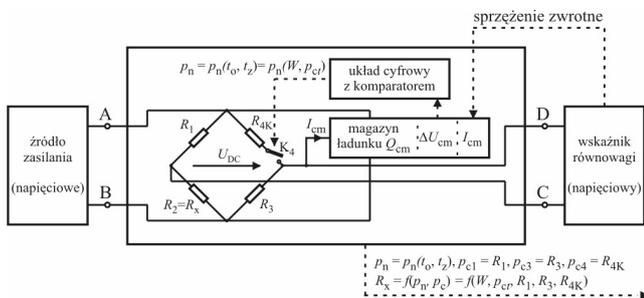


Rys. 1. Mostkowy układ pomiarowy według definicji Karandiejewa. R_x – rezystancja mierzona
Fig. 1. Measuring bridge idea according to the definition given by Karandeev

3. Równoważony ładunkowo analogowo - cyfrowy mostek rezystancyjny

Na rysunku (rys. 2) przedstawiono czteroramienny mostek analogowo-cyfrowy równoważony za pomocą jednego klucza. Ten podstawowy układ nowej klasy analogowo-cyfrowych mostków rezystancyjnych, pokazano z zaznaczeniem parametrów, które są zmieniane (pojęcie użyte w definicji Karandiejewa) w celu osiągnięcia równowagi oraz parametrów niezmiennych się. Zaznaczono sprzężenie zwrotne od wskaźnika równowagi, które oddziałuje na prąd płynący do magazynu ładunku. Parametrem regulowanym w celu zrównoważenia mostka jest wartość funkcji czasu załączenia klucza i czasu wyłączenia klucza. Funkcję tę zdefiniowano jako iloraz łącznego czasu załączenia klucza (t_{zp}) do czasu pomiaru (T) i nazwano *współczynnikiem kluczowania K*:

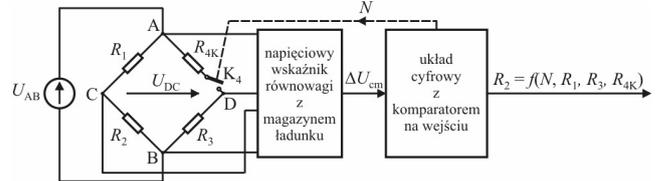
$$K = \frac{t_{zp}}{T} \quad (1)$$



Rys. 2. Czteroramienny mostek rezystancyjny równoważony ładunkowo za pomocą jednego klucza – najprostszy układ mostka analogowo-cyfrowego spełniający definicję Karandiejewa
Fig. 2. Simple A/D resistance bridge satisfying Karandeev definition

Analogicznie do mostka Wheatstone'a, wśród czterech rezystorów w ramionach mostka jeden jest *obiektem pomiaru* (np. R_2), a jeden spośród pozostałych trzech *obiektem porównawczym* – *wzorcem* (np. R_1). Natomiast inaczej zbudowany jest obwód służący do porównywania dwóch napięć – tzw. *wskaźnik różnicowy* [1]. Poza pozostałymi dwoma rezystorami (R_3 i R_{4K}) i

wskaźnikiem równowagi (występującymi również w mostku Wheatstone'a), dodatkowo w obwodzie wskaźnika różnicowego występuje magazyn ładunku, układ cyfrowy z komparatorem na wejściu, oraz klucz (K_4). Funkcje wskaźnika równowagi oraz magazynu ładunku może spełniać jeden układ (rys. 3).



Rys. 3. Mostek równoważony ładunkowo za pomocą jednego klucza
Fig. 3. DC resistance bridge balanced by one switch charge control

4. Pomiary mostkiem równoważonym ładunkowo

Analogowo-cyfrowe mostki rezystancyjne równoważone są ładunkowo. Ładunkowe równoważenie mostka polega na cyklicznym przełączaniu rezystancji w co najmniej jednym z ramion mostka (np. R_{4K} , rys. 3). Jest to możliwe przy zastosowaniu odpowiednio sterowanego *magazynu ładunku* dołączonego do jednego z węzłów w *przekątnej wskaźnika*.

Równoważenie przeprowadzane jest za pomocą klucza.

Parametrem regulowanym (p_n) jest współczynnik kluczowania, oznaczony przez K_4 . Wartość tego parametru odpowiadającą stanowi zrównoważenia mostka analogowo-cyfrowego, nazwano *nastawą współczynnika kluczowania*.

Dla znanej *nastawy współczynnika kluczowania*, wartość mierzonej rezystancji wyliczana jest z warunku równowagi mostka.

Przełączając za pomocą klucza (K_4) jeden stały rezystor (R_{4K}), steruje się przepływem ładunku w ramionach mostka tak, że układ mostkowy utrzymywany jest w stanie równowagi (wartości chwilowe napięcia na przekątnej pomiarowej CD są równe 0). Klucz przełączający rezystancję (N – razy w okresie zliczania) jest sterowany przez układ cyfrowy z komparatorem na wejściu, dla którego sygnałem wejściowym jest zmiana napięcia (ΔU_{cm}) proporcjonalna do zmiany wielkości ładunku gromadzonego w magazynie ładunku.

4.1. Magazyn ładunku

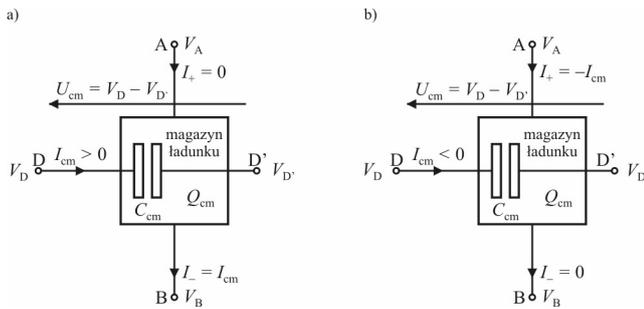
Magazyn ładunku (rys. 4) jest to układ o pojemności elektrycznej C_{cm} , który:

- gromadzi ładunek elektryczny Q_{cm} , dopływający do niego przez wejście prądowe D, gdy prąd $I_{cm} > 0$,
- oddaje ładunek elektryczny Q_{cm} z końcówki D, gdy $I_{cm} < 0$. Prąd I_{cm} zmienia ładunek magazynu w ten sposób, że potencjał na wejściu magazynu (V_D) jest stały. Napięcie U_{cm} pomiędzy wejściem prądowym D i wyjściem napięciowym D' magazynu ładunku ($U_{cm} = V_D - V_{D'} = Q_{cm} / C_{cm}$) jest wprost proporcjonalne do wielkości zgromadzonego w nim ładunku Q_{cm} i odwrotnie proporcjonalne do jego pojemności C_{cm} .

Układ ten wymaga zasilania. W sytuacji, gdy $I_{cm} > 0$ (prąd wpływa do magazynu ładunku), taka sama ilość ładunku jaka doprowadzana jest do końcówki D magazynu ładunku, musi zostać odprowadzona z końcówki B tego magazynu do źródła zasilania (prąd I_+ , rys. 4a). Potencjał V_B jest niższy od potencjału V_D wejścia D ($V_B < V_D$).

Natomiast w sytuacji, gdy prąd przez końcówkę D wypływa z magazynu ładunku ($I_{cm} < 0$), to do końcówki A dopływa prąd ze źródła zasilania (I_+ , rys. 4b). Potencjał V_A jest wyższy od potencjału V_D wejścia D ($V_A > V_D$).

W efekcie takiego pompowania ładunku napięcie na pojemności C_{cm} rośnie (lub maleje) liniowo w funkcji czasu.



Rys. 4. Magazyn ładunku: a) $I_{cm} > 0$, b) $I_{cm} < 0$
Fig. 4. The charge store unit a) $I_{cm} > 0$, b) $I_{cm} < 0$

4.2. Odczyt nastawy parametru regulowanego

Dzięki sprzężeniu zwrotnemu (rys. 2) występującemu pomiędzy wskaźnikiem równowagi, a magazynem ładunku, do magazynu ładunku płynie prąd (I_{cm}) o takim natężeniu, żeby mostek pozostawał w równowadze ($U_{DC} = 0$). Układ cyfrowy z komparatorem na wejściu śledzi zmiany napięcia na wyjściu magazynu ładunku (ΔU_{cm}), które to zmiany są proporcjonalne do zmian wielkości ładunku gromadzonego w magazynie ładunku. Klucz (K_4) przełączający rezystancję (R_{4K}), sterowany jest przez układ cyfrowy w ten sposób, żeby utrzymać zerową wartość średnią ładunku gromadzonego w określonym czasie w magazynie ładunku. Dzięki temu układ mostka analogowo-cyfrowego pozostaje w równowadze. Ten sterowany przepływ ładunku stanowi podstawę przyjęcia dla analizowanego układu nazwy „mostek równoważony ładunkowo”.

Zerowemu stanowi napięcia na wejściu wskaźnika równowagi, przy określonych wartościach parametrów niezmiennych mostka p_c (R_1, R_3 i R_{4K} , p_c) oraz ustalonej wartości rezystancji mierzonej R_x (R_2) odpowiada określona nastawa parametru regulowanego (nastawa współczynnika kluczowania K_4).

W mostku równoważonym ładunkowo nastawa parametru regulowanego nie jest odczytywana bezpośrednio lecz jest wyliczana z wartości wielkości odczytywanej W . Sposób odczytu nastawy parametru regulowanego definiowany jest za pomocą funkcji odczytu (4).

Funkcję odczytu (dla przypadku prezentowanego w referacie) zdefiniowano jako liczbę impulsów (N_x) załączających klucz na określony czas (t_z) w okresie zliczania T . Czas pomiaru T jest równy całkowitej wielokrotności (k_z) czasu zamknięcia klucza (t_z). W tym przypadku, aby obliczyć współczynnik kluczowania według równania (1), należy obliczyć łączny czas załączenia klucza (t_{zp}):

$$t_{zp} = N_x \cdot t_z, \quad (2)$$

oraz czas pomiaru (T):

$$T = k_z \cdot t_z. \quad (3)$$

Uwzględniając (2) i (3) współczynnik kluczowania (1) jest równy:

$$K = \frac{N_x \cdot t_z}{T} = \frac{N_x}{k_z}. \quad (4)$$

Wielkością odczytywaną (W) jest liczba impulsów N_x , a parametrem kluczowania jest współczynnik k_z , który nazwano dalej współczynnikiem rozdzielczości układu zliczającego liczbę załączeń klucza na określony czas (t_z) w okresie zliczania T .

4.3. Warunek równowagi

Dla parametru regulowanego zdefiniowanego przez (4), po analizie [3, 4], wylicza się warunek równowagi mostka równoważonego ładunkowo kluczem K_4 :

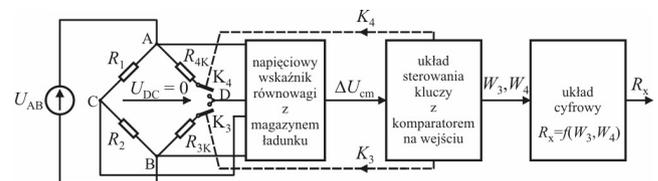
$$\frac{R_2 \cdot R_{4K}}{R_1 \cdot R_3} = \frac{N_{x4}}{k_{z4}} = K_4. \quad (5)$$

Dla mostka analogowo-cyfrowego równoważonego kluczem K_3 (rys. 5) obowiązuje równanie równowagi:

$$\frac{R_1 \cdot R_{3K}}{R_2 \cdot R_4} = \frac{N_{x3}}{k_{z3}} = K_3. \quad (6)$$

Równanie równowagi dla układu z dwoma kluczami (rys. 5) zapisuje się w postaci:

$$\frac{R_1 \cdot R_{3K}}{R_2 \cdot R_{4K}} = \frac{K_3}{K_4}. \quad (7)$$



Rys. 5. Mostek równoważony ładunkowo z dwoma kluczami
Fig. 5. DC resistance bridge balanced by two switch charge control

5. Uogólnienie definicji pomiarów mostkowych

Wprowadzono pojęcia:

▪ *Proporcja nastaw rezystancji mostka (P_R)*. Jest to iloraz iloczynów rezystancji ramion naprzeciwległych mostka (8):

$$P_R = \frac{R_1 \cdot R_{3K}}{R_2 \cdot R_{4K}}. \quad (8)$$

▪ *Proporcja nastaw czasów (P_T)*. Jest to iloraz współczynników kluczowania (9) równy proporcji czasów:

$$P_T = \frac{K_3}{K_4} = \frac{t_{zp3} \cdot T_4}{t_{zp4} \cdot T_3}. \quad (9)$$

Uwzględniając (8) i (9), równanie równowagi (7) przyjmuje postać (10):

$$P_R = P_T. \quad (10)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy mostka równoważonego ładunkowo uogólniono definicję mostkowej metody pomiaru, podaną przez Karandiejewa [1] dla mostka Wheatstone'a. Uogólnienie dotyczy pomiarów mostkiem zrównoważonym, ponieważ część definicji dotycząca wykorzystania układów niezrównoważonych nie dotyczy mostków równoważonych ładunkowo.

Istota działania mostka równoważonego ładunkowo polega na tym, iż przy zachowaniu równości proporcji nastaw, zwanej warunkiem równowagi (10), różnica potencjałów między węzłami przekątnej wskaźnika (rys. 5) jest równa zero.

Tak więc, jeśli przez odpowiednią regulację współczynników kluczowania oraz rezystancji ramion „zrównoważy się” mostek, to korzystając z warunku równowagi, można określić poszukiwaną wartość rezystancji jednego ramienia, gdy znane są

rezystancje trzech pozostałych ramion oraz proporcja nastaw kluczy. Szczególnym przypadkiem mostka zrównoważonego ładunkowo jest zrównoważony mostek (prądu stałego) Wheatstone'a. Mostek Wheatstone'a otrzymuje się z mostka zrównoważonego ładunkowo gdy klucze są stale zamknięte ($P_T = 1$).

W układzie mostka Wheatstone'a wartość proporcji P_R spełnia relacje:

- $P_R = 1$ – dla mostków zrównoważonych,
- $P_R \neq 1$ – dla mostków niezrównoważonych.

W układach mostkowych nowej klasy, *proporcja nastaw rezystancji* w stanie zrównoważenia może mieć także wartości różne od 1 ($P_R \neq 1$).

6. Podstawowe właściwości mostków zrównoważonych ładunkowo

W równaniu równowagi mostka zrównoważonego ładunkowo iloczyn rezystancji naprzeciwległych ramion nie muszą być równe:

$$R_1 \cdot R_{3K} = P_T \cdot R_2 \cdot R_{4K}. \quad (11)$$

Wartość P_T nie musi być równa jeden. Przy nastawieniu odpowiedniej wartości P_T mostek jest zrównoważony. Dla układu z (jednym) kluczem K_4 równanie (11) ma postać (12):

$$R_1 \cdot R_{3K} = \frac{k}{N} \cdot R_2 \cdot R_{4K}. \quad (12)$$

Wykazano [4, 6, 7], że dzięki temu uzyskuje się nowe właściwości aplikacji układów mostkowych, takie jak:

- możliwość cyfrowej zmiany czułości mostka:

$$N = k \cdot \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3}. \quad (13)$$

- możliwość porównania dwu różnych stosunków rezystancji (konduktancji):

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{k}{N} \cdot \frac{R_4}{R_3}. \quad (14)$$

- możliwość bezpośredniego wskazania konduktancji, rezystancji lub stosunku rezystancji (lub konduktancji)

▪ możliwość równoważenia z zasady niezrównoważonych mostków rezystancyjnych takich jak mostki tensometryczne. Umożliwia to bezpośrednie porównanie względnych zmian rezystancji tensometrów ze względnymi zmianami czasu lub częstotliwości:

$$\frac{N}{k} = \frac{\Delta R}{R}. \quad (15)$$

- możliwość automatycznej cyfrowej adjustacji, wynikająca z możliwości: cyfrowej zmiany czułości mostka, cyfrowego przesuwania charakterystyki, cyfrowego kształtowania charakterystyki.

Wykazano [3, 4], że przez dołączanie dodatkowego rezystora uzyskuje się strukturę umożliwiającą pomiar różnicy rezystancji:

$$\Delta R_2 = R - R_{20} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_4} \cdot \frac{N}{k}. \quad (16)$$

7. Podsumowanie

W układach służących do cyfrowych pomiarów rezystancji stosowanych dotychczas, najczęściej pomiary realizowane są dwuetapowo:

1. Rezystancja (wielkość analogowa) jest przetwarzana na sygnał analogowy.

2. Sygnał analogowy jest przetwarzany na postać cyfrową w przetworniku analogowo-cyfrowym (rys. 6).



Rys. 6. Stosowane najczęściej metody (dwuetapowe) realizacji cyfrowych pomiarów rezystancji: R_x – mierzona rezystancja, R/U – przetwornik rezystancji na sygnał analogowy napięciowy, A/D – przetwornik analogowo-cyfrowy, $N_x(R_x)$ – wynik pomiaru w postaci liczby, $f_x(R_x)$ – częstotliwość jako wynik pomiaru Fig. 6. Commonly realized digital resistance measurement (two stage conversion). R_x – measured resistance, R/U – resistance to analog voltage converter, A/D analog to digital voltage converter, $N_x(R_x)$ – measurement result in a number form, $f_x(R_x)$ – measurement result in a frequency form

Istotną oryginalną różnicą nowej klasy analogowo-cyfrowych zrównoważonych mostków prądu stałego, w stosunku do stosowanych układów, jest przetwarzanie jednoetapowe (bezpośrednie) rezystancji (wielkości analogowej) na sygnał cyfrowy (rys. 7).



Rys. 7. Analogowo-cyfrowy zrównoważony mostek rezystancyjny. (R/D) - jednoetapowa realizacja cyfrowego pomiaru rezystancji Fig. 7. A/D balanced DC resistance bridge as a resistance to digital signal converter (one stage conversion)

Mostki zrównoważone ładunkowo mają właściwości mostków zrównoważonych, a przy tym dają wyniki w postaci cyfrowej bez zastosowania dodatkowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Te właściwości pozwalają zastąpić nimi trzy inne klasy układów wykorzystywanych do pomiaru rezystancji:

1. Klasyczne zrównoważone mostki rezystancyjne (m.in. mostek zrównoważony Wheatstone'a), które nie mają wyjść cyfrowych.
2. Układy służące do cyfrowego pomiaru rezystancji zawierające przetworniki analogowo-cyfrowe.
3. Klasyczne niezrównoważone mostki rezystancyjne (m.in. niezrównoważony mostek Wheatstone'a z tensometrami), które nie mają wyjść cyfrowych.

Ponadto mostki nowej klasy mają nowe właściwości [2, 6, 7].

Także interesujące właściwości mają równoważone ładunkowo „układy mostkowe zasilane dwuprządowo” [2, 5].

8. Literatura

- [1] Karandziejew K. B.: Pomiary elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi. WNT, Warszawa 1969.
- [2] Tync B.: Mostki tybo® - ładunkowo zrównoważone układy jako oryginalne pomiarowe przetworniki analogowo-cyfrowe. Pomiar Automatyka Kontrola nr 3, 2002, strony od 21 do 23.
- [3] Tync B.: Ładunkowo zrównoważony układ mostkowy do pomiaru temperatury. Materiały konferencji: Podstawowe Problemy Metrologii, PAN, Ustroń, maj 2003, strony od 67 do 78.
- [4] Tync B.: Układ do pomiaru temperatury wykorzystujący mostek z termorezystorem równoważony ładunkowo. Praca magisterska. Politechnika Śląska, Gliwice 2004.
- [5] Tync B.: Ładunkowo zrównoważony układ mostkowy o dwuprządowym zasilaniu. XXXVI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Ustroń, czerwiec 2004, strony od 77 do 84.
- [6] Skubis, T, Tync B.: Cyfrowe pomiary rezystancji mostkami zrównoważonymi. XII Międzynarodowe Seminarium Metrologów, Rzeszów, wrzesień 2004, strony od 159 do 169.
- [7] Skubis, T, Tync B.: Cyfrowe pomiary rezystancji mostkami zrównoważonymi. Pomiar Automatyka Kontrola nr 12, 2004, strony od 5 do 8.

Artykuł recenzowany