

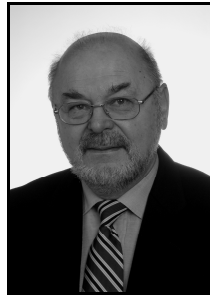
Tadeusz SKUBIS

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

Analiza czteroramiennego mostka rezystancyjnego równoważonego prądem obciążenia węzła przekątnej detektora

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS

Studia ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w roku 1970. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1975, stopień doktora habilitowanego w roku 1995 w dyscyplinie Elektrotechnika, a tytuł profesora w roku 2005. Od roku 2003 kieruje Instytutem Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w elektrycznych pomiarach dokładnych wielkości fizycznych, zwłaszcza składowych impedancji.



e-mail: tadeusz.skubis@polsl.pl

Streszczenie

Wyprowadzono równanie równowagi mostka rezystancyjnego czteroramiennego o dowolnych wartościach rezystancji w ramionach. Wykazano, że przy określonym trybie przełączania źródła prądowego obciążającego mostek, pozostaje on przez cały czas zrównoważony, mimo że rezystancje ramion nie spełniają warunku równowagi mostka Wheatstone'a. Przedstawiono podstawy teoretyczne działania układu w oparciu o analizę obciążonego dzielnika rezystancyjnego. Wskazano niektóre możliwości pomiarowe układu.

Słowa kluczowe: mostek Wheatstone'a, dokładne pomiary rezystancji, mostek zrównoważony, dzielnik rezystancyjny.

Analysis of four-arm resistance bridge balanced by the current flowing into detector node

Abstract

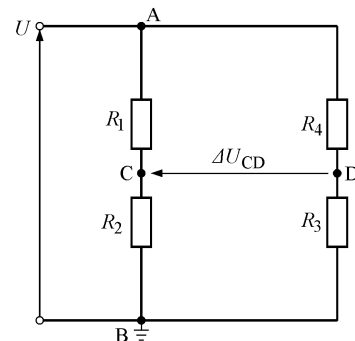
Balance equation of four-arm resistance bridge built up of resistors of any values is deduced. It is shown that the bridge remains all time in the balance state if specific mode of the switching of the loading current source is kept, although arm resistances don't fulfill balance condition of the Wheatstone bridge. Theoretical principle of the circuit work is presented, basing on the analysis of the loaded resistive divider. Some features of the circuit are pointed out.

Keywords: Wheatstone bridge, precise resistance measurement, balanced bridge, resistive divider.

1. Wprowadzenie

W 1833 roku Christie zauważył, że jeżeli połączy się równoległe dwa nieobciążone rezystancyjne dzielniki napięcia stałego (RDNS) i zasilą się je ze wspólnego źródła napięcia U , to różnica ΔU_{CD} napięcia między odczepami dzielników wynosi 0, jeżeli przekładnie tych dzielników mają jednakowe wartości. To spostrzeżenie opisane i zastosowane przez Wheatstone'a stało się fundamentem jednego z podstawowych układów pomiarowych rezystancji, znanego dzisiaj jako zrównoważony mostek Wheatstone'a (rys. 1).

Układ należy do klasyki podstaw metrologii elektrycznej [9]. Jego właściwości zostały dobrze poznane i opisane już dawno, a nowych oryginalnych publikacji nie ma. W środowisku metrologów panuje pogląd, że chociaż mostek Wheatstone'a jest bardzo użyteczny w praktyce, to jednak układ ten jest nierozwojowy od strony naukowej, ponieważ wszystkie szczegóły teorii i konstrukcji zostały już rozwiązane. Przez lata były produkowane mostki Wheatstone'a wielodekadowe, równoważone ręcznie lub automatycznie, które nadal są stosowane do dokładnych pomiarów rezystancji. Szeroko są stosowane także liczne aplikacje tego układu w torach przetwarzania nowoczesnych przyrządów do pomiarów wielkości nieelektrycznych.



Rys. 1. Schemat mostka Wheatstone'a z przyjętymi oznaczeniami
Fig. 1. Wheatstone bridge diagram and their arm denotations

Około 20 lat temu B. Tync opracował i rozpoczął produkcję mostkowych układów pomiarowych rezystancji [6, 7], których idea stanowi rozwinięcie pomysłu Christiego [4]. Na podstawie analizy działania tych układów można zauważyć, że z dwu dzielników rezystancyjnych, które w stanie bez obciążenia mają różne wartości przekładni, można utworzyć zrównoważony mostek rezystancyjny, jeżeli przynajmniej jeden z nich będzie obciążony od strony odczepu prądem o odpowiednio dobranej wartości. To spostrzeżenie było punktem wyjścia do wykonania analizy uogólnionego układu mostka rezystancyjnego zrównoważonego. Uogólnienie polega na założeniu, że w układzie mostka rezystancyjnego Wheatstone'a z jednego węzła przekątnej pomiarowej jest odprowadzany lub doprowadzany prąd o takim natężeniu, aby utrzymać stan równowagi mostka. Jest to idea, której opisu nie ma w nawet w nowych szczegółowych pracach dotyczących różnych możliwości aplikacyjnych mostków rezystancyjnych [2].

2. Przekładnia RDNS obciążonego źródłem prądowym

Przeanalizowano układ RDNS, zasilanego ze źródła napięciowego o zerowej wartości rezystancji wewnętrznej, obciążonego prądem źródła prądowego o nieskończonej wartości rezystancji wewnętrznej. Przekładnię napięciową RDNS (rys. 2a) określa równanie ogólne:

$$D_{34} = \frac{U_3}{U} = \frac{U_3}{U_3 + U_4} \quad (1)$$

Napięcia U_3 , U_4 zależą od natężeń prądów płynących przez rezystancje R_3 , R_4 . Natężenia tych prądów dla dzielnika obciążonego i nieobciążonego są różne. W obu ramionach dzielnika nieobciążonego płynie tylko prąd wejściowy I_{we} (rys. 2a):

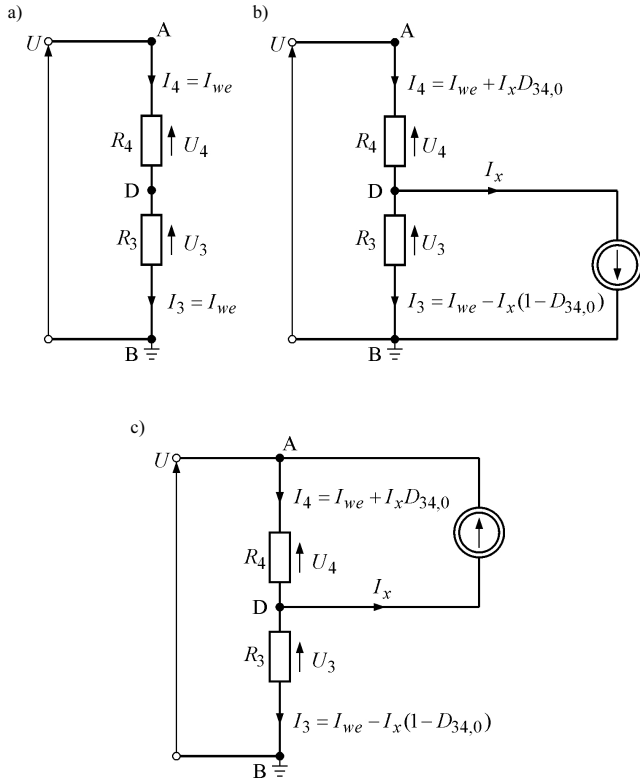
$$I_3 = I_4 = I_{we} = \frac{U}{R_3 + R_4} \quad (2)$$

Przekładnię nieobciążonego RDNS można zatem wyrazić równaniem:

$$D_{34,0} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (3)$$

Indeks 0 w oznaczeniu przekładni dzielnika oznacza, że wartość dotyczy dzielnika nieobciążonego.

W ramionach dzielnika obciążonego płyną dodatkowo części prądu obciążenia I_x . W przypadku dzielnika obciążonego źródło prądowe obciążające jest włączone między odczep dzielnika (punkt D) oraz jedną z dwu końcówek źródła napięcia zasilania, punkt B o potencjale masy (rys. 2b) albo punkt A o wysokim potencjale U (rys. 2c).



Rys. 2. Schematy zastępcze dzielnika rezystancyjnego a) nieobciążonego, b), c) obciążonego źródłem prądowym
Fig. 2. Equivalent circuits of the resistive voltage divider, a) unloaded divider, b), c) divider loaded by current I_x

W przypadku idealnych źródeł napięcia i prądu oba schematy zastępcze dzielnika obciążonego są w istocie identyczne, ponieważ przy obliczeniu rozpyły prądu w układzie źródło napięciowe stanowi zwarcie, a źródło prądowe stanowi przerwę. Dzielnik R_3, R_4 jest dla źródła prądowego dzielnikiem prądowym, a dla źródła napięcia jest dzielnikiem napięciowym. Rozdział prądu obciążenia I_x na rezystory R_3, R_4 w obu układach połączenia źródła prądowego jest taki sam. Prąd w każdym ramieniu dzielnika obciążonego ma dwa składniki: prąd wejściowy I_{we} zależny od źródła napięcia U , który jest taki sam jak w nieobciążonym RDNS, oraz część prądu obciążenia I_x . Prąd obciążenia I_x rozdziela się na ramiona dzielnika w takim stosunku, aby spadki napięcia na rezystancjach R_3, R_4 od tego składnika prądu były jednakowe. Prądy sumaryczne w ramionach obciążonego RDNS wynoszą:

$$I_3 = I_{we} - I_x(1 - D_{34,0}) \quad (4)$$

$$I_4 = I_{we} + I_x D_{34,0} \quad (5)$$

Na rysunkach 2b, c, zaznaczono prądy płynące w obu ramionach dzielnika.

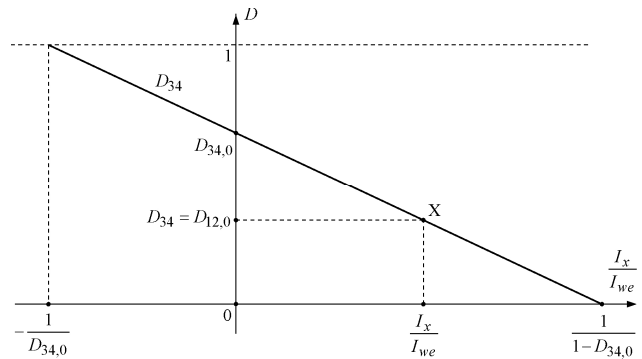
Wyrażając napięcia ramion obciążonego RDNS przy uwzględnieniu prądów wyrażonych przez (4) i (5) oraz uwzględniając (3), oblicza się z równania (1) przekładnię dzielnika obciążonego, oznaczoną przez D_{34} :

$$D_{34} = D_{34,0} \left[1 - \frac{I_x}{I_{we}} (1 - D_{34,0}) \right] \quad (6)$$

W obu przedstawionych układach obciążonego RDNS źródło prądowe pobiera prąd I_x z węzła D. Przy odwrotnym zastrzałkowaniu prądu I_x źródło będzie oddawać prąd do węzła D, co nie ogranicza ogólności dalszej analizy. Wynikają stąd następujące wnioski, dotyczące obciążonego RDNS:

1. Prąd obciążenia dzielnika można odprowadzać z węzła D do dowolnej końcówki źródła napięcia zasilania.
2. Przekładnia D_{34} dzielnika obciążonego zależy liniowo od stosunku prądu obciążenia I_x do prądu wejściowego I_{we} dzielnika nieobciążonego. Nachylenie tej prostej w układzie $(I_x/I_{we}, D_{34})$ zależy od wartości przekładni $D_{34,0}$ dzielnika nieobciążonego (rys. 3).

Na rys. 3 przedstawiono wykres zależności przekładni dzielnika obciążonego od względnej wartości prądu obciążenia. Część charakterystyki dla $I_x > 0$ odpowiada odbieraniu prądu I_x z węzła D (kierunek przepływu prądu jak na rys 2b, c), a część charakterystyki dla $I_x < 0$ odpowiada dostarczaniu prądu I_x do węzła D (kierunek przepływu prądu odwrotny). Na charakterystyce zaznaczono przez X punkt równowagi mostka.



Rys. 3. Charakterystyka przekładni dzielnika obciążonego w funkcji względnej wartości prądu obciążenia
Fig. 3. Resistive divider ratio curve vs. relative load current value

Z równania (6) oblicza się wartości I_x/I_{we} dla przypadków skrajnych.

$$\text{a) dla } D_{34} = D_{34,0} \Rightarrow \frac{I_x}{I_{we}} = 0$$

W przypadku, gdy prąd obciążenia RDNS dąży do 0, przekładnia dzielnika obciążonego dąży do wartości przekładni nieobciążonego RDNS.

$$\text{b) dla } D_{34} = 0 \Rightarrow \frac{I_x}{I_{we}} = \frac{1}{1 - D_{34,0}}$$

$$\text{c) dla } D_{34} = 1 \Rightarrow \frac{I_x}{I_{we}} = -\frac{1}{D_{34,0}}$$

3. Mostek rezystancyjny czteroramienny

Każdy mostek czteroramienny może być potraktowany jako równoległe połączenie dwu dzielników rezystancyjnych o dowolnych wartościach przekładni w stanie bez obciążenia. Nastawiając odpowiednią wartość prądu obciążenia I_x jednego z dzielników można zrównoważyć każdy mostek rezystancyjny czteroramienny. Można zatem spełnić równanie:

$$D_{12,0} = D_{34} \quad (7)$$

Uwzględniając równania (6) i (7) oraz przekładnię dzielnika nieobciążonego o rezystancjach R_1, R_2 oblicza się dla stanu równowagi mostka:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \left[1 - \frac{I_x}{I_{we}} \left(1 - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \right] \quad (8)$$

Z równania (8), uwzględniając (2), oblicza się równanie równowagi mostka czteroramiennego, obowiązujące dla dowolnych wartości $R_1 \dots R_4$:

$$\frac{I_x}{U} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) R_3 R_4} \quad (9)$$

Po uwzględnieniu definicji przekładni RDNS nieobciążonego złożonego z R_1 i R_2 , równanie równowagi mostka można zapisać w postaci:

$$\frac{I_x}{U} = \frac{(1 - D_{12,0})}{R_4} - \frac{D_{12,0}}{R_3} \quad (10)$$

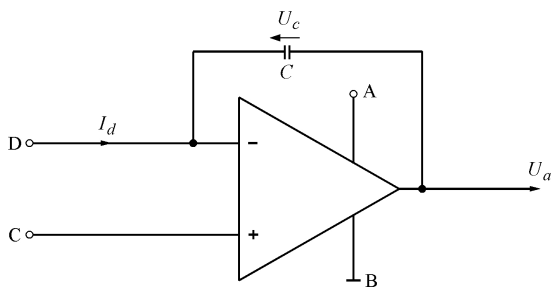
Warunek równowagi układu można wyrazić następująco: jeżeli źródło prądowe w mostku rezystancyjnym czteroramiennym o obciążonym jednym dzielniku pobiera lub oddaje prąd o takim natężeniu, że napięcie na wejściu źródła prądowego jest równe $U_2 = U_3$, to mostek jest zrównoważony ($\Delta U_{CD} = 0$) dla dowolnych wartości $R_1 \dots R_4$. Należy zauważyć, że dla $I_x = 0$ z równania (9) otrzymuje się równanie równowagi zrównoważonego mostka Wheatstone'a.

4. Zrównoważony mostek czteroramienny o przełączalnej strukturze

B. Tync zaproponował [5], żeby źródło prądowe w układzie mostka czteroramiennego pracowało w dwu kolejno po sobie następujących trybach pracy:

- 1) w trybie pobierania prądu z węzła D. Prąd ten oznaczono dalej przez I_d , przy czym $I_d = I_x$,
- 2) w trybie dostarczania prądu do węzła D. Prąd ten oznaczono dalej przez I_r , przy czym $I_r = -I_x$.

Zaproponowany został prosty układ aktywnego rewersyjnego źródła prądowego, które jednocześnie spełnia funkcje przełącznika rezystora R_4 i detektora zerowego napięcia na przekątnej C,D mostka [8]. Na rys. 4 przedstawiono schemat ideowy źródła, bez przełącznika rezystora R_4 , który jest sterowany napięciem wyjściowym U_a wzmacniacza. Jest to układ całkujący stały prąd I_d [1]. W układzie mostka o przełączalnej strukturze pobiera ono najpierw prąd I_d z węzła D, a po przełączeniu trybu pracy dostarcza prąd I_r do węzła D.



Rys. 4. Schemat ideowy aktywnego źródła prądowego z przyjętymi oznaczeniami
Fig. 4. Diagram of the active current source and denotations used

Zmiana trybu pracy źródła dokonuje się automatycznie, po określonej modyfikacji układu mostkowego, który jest układem wejściowym źródła. Układ mostka w trybie pobierania prądu I_d z węzła D przedstawiono na rys. 5.

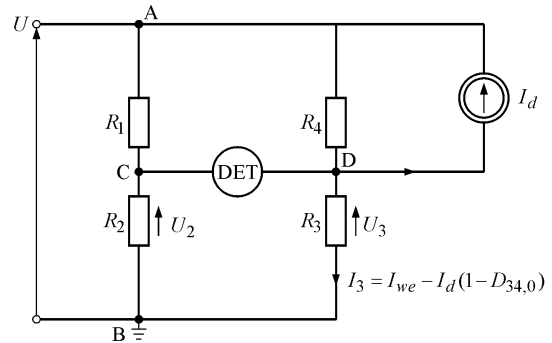
Prąd I_3 oraz napięcie U_3 są określone wzorami:

$$I_3 = \frac{U}{R_3 + R_4} - I_d \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (11)$$

$$U_3 = R_3 I_3 = \frac{U R_3}{R_3 + R_4} - \frac{I_d R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (12)$$

Gdy różnica potencjałów między punktami C,D wynosi 0, spełniony jest warunek:

$$U_2 = U_3 \quad (13)$$



Rys. 5. Schemat mostka rezystancyjnego czteroramiennego o obciążonej prądowo gałęzi R_3, R_4

Rys. 5. Diagram of four-arm resistance bridge with branch R_3, R_4 loaded by current I_d

Wyrażając U_2 przez rezystancje dzielnika R_1, R_2 oraz podstawiając równanie (12) do (13), otrzymuje się zależność prądu I_d pobieranego przez źródło z węzła D mostka:

$$I_d = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) R_3 R_4} \quad (14)$$

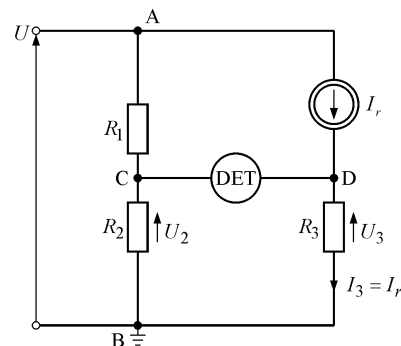
Aby prąd był pobierany przez źródło (lub miał wartość 0), czyli $I_d \geq 0$, rezystancje mostka muszą spełniać warunek:

$$R_1 R_3 \geq R_2 R_4 \Rightarrow \frac{R_1 R_3}{R_2 R_4} \geq 1 \quad (15)$$

Jeżeli ramię R_4 zostanie rozwarne ($R_4 = \infty$), to z równania (10) otrzymuje się warunek równowagi dla tego nowego układu:

$$\frac{I_x}{U} = - \frac{D_{12,0}}{R_3} \quad (16)$$

W tym przypadku źródło prądowe musi dostarczać prąd o odwrotnym kierunku, niż zaznaczony na rys. 2b, c, czyli ma być $-I_x = I_r$. Układ mostka w trybie dostarczania prądu I_r do węzła D przedstawiono na rys. 6 Układ z rysunku 5 jest zmodyfikowany w ten sposób, że rezystancja R_4 została odłączona, a kierunek prądu źródła został odwrócony. W ramieniu „4” pozostaje włączone źródło prądowe, o prądzie oznaczonym teraz przez I_r . W tym układzie cały prąd I_r płynie przez R_3 , a jego obwód zamyka się przez źródło napięcia U .



Rys. 6. Schemat mostka rezystancyjnego czteroramiennego o źródle prądowym I_r w ramieniu „4”

Rys. 6. Diagram of four-arm resistance bridge with the current source in arm no „4”

Dla układu przedstawionego na rysunku 6 z równości potencjałów w punktach C,D wynika równanie:

$$\frac{UR_2}{R_1 + R_2} = R_3 I_r \quad (17)$$

Stąd oblicza się:

$$I_r = \frac{UR_2}{(R_1 + R_2)R_3} \quad (18)$$

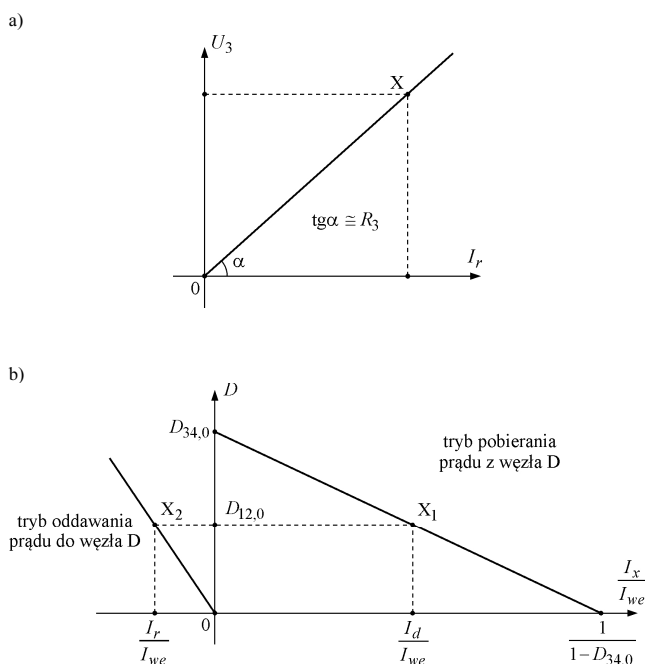
Należy zauważyć, że układy przedstawione na rys. 5 i 6 złożone są z trzech tych samych rezystorów (R_1, R_2, R_3). Źródło prądowe pracuje w trybie pobierania prądu w układzie z rys. 5, a w trybie dostarczania prądu w układzie z rys. 6. Układy te można wzajemnie łatwo przełączać przez kluczkowanie rezystora R_4 .

Jeżeli w ramieniu „4” mostka jest włączony rezystor R_4 , którego wartość spełnia relację (15), to prosty układ źródła prądowego zaproponowany w [5] może tylko pobierać prąd $I_x = I_d$ z węzła D. W tym stanie punkt pracy X na charakterystyce przekładni dzielnika obciążonego (rys. 3) może znajdować się tylko na odcinku ograniczonym punktami o współrzędnych $(0; D_{34})$ oraz $(\frac{1}{1-D_{34}}; 0)$.

Przesunięcie punktu X na odcinek ograniczony punktami $(-\frac{1}{D_{34}}; 1)$ oraz $(0; D_{34})$ wymagałoby innej realizacji układowej

źródła prądowego. Taki układ źródła prądowego ani też właściwości mostka z takim źródłem nie są przedmiotem analizy w tej pracy.

Gdy ramię „4” mostka jest rozwarte układ ten oddaje do węzła D prąd $I_r = -I_x$. Na skutek działania ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza prąd I_r przyjmuje taką wartość, aby utrzymać w węźle D potencjał U_3 , spełniający równanie (13). W tym trybie pracy układu rezystor R_3 działa jak przetwornik I/U , na którego wejściu jest prąd I_r , a na wyjściu jest napięcie U_3 (rys. 7a). Przeskalowując liniowo współrzędne na I_r/I_{we} oraz $U_3/U = D_{12,0}$ (równania (1) i (7)) można przedstawić położenie punktu pracy X układu w obu trybach na jednym wspólnym rysunku (rys. 7b).



Rys. 7. a) Charakterystyka przetwornika rezystancyjnego I_r/U_3 , b) położenie punktów pracy X_1, X_2 w dwu trybach pracy układu

Fig. 7. a) The resistance transducer I_r/U_3 curve, b) working point position X_1, X_2 at two modes of the switched circuit

5. Równanie równowagi mostka równoważonego ładunkowo

Wprowadzono oznaczenia:

t_z – przedział czasu, w którym rezystor R_4 pozostaje załączony (czas pracy układu w konfiguracji według rys. 5),

t_o – przedział czasu, w którym rezystor R_4 pozostaje odłączony (czas pracy układu w konfiguracji według rys. 6).

Jeżeli czasy pracy źródła w obu trybach dobierze się tak, aby były odwrotnie proporcjonalne do prądów I_d i I_r , to ładunek pobierany przez źródło prądowe w trybie pobierania prądu będzie równy ładunkowi oddawanemu w trybie dostarczania prądu.

$$I_d t_z = I_r t_o \quad (19)$$

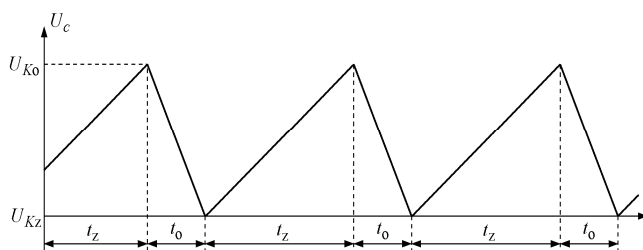
Podstawiając (14) i (18) do (19) otrzymuje się:

$$\frac{t_o}{t_z} = \frac{I_d}{I_r} = \frac{R_1 R_3}{R_2 R_4} - 1 \quad (20)$$

Jeżeli wartości rezystancji $R_1 \dots R_4$ spełniają warunek (15), to równanie (20) opisuje układ realizowalny fizycznie (czasy t_o, t_z są nieujemne). Równanie (20) wiąże liniowo stosunek czasów pracy źródła w dwu opisanych trybach ze stosunkami rezystancji w ramionach mostka. Mierząc stosunek czasów można z równania (20) obliczyć np. wartość dowolnego rezystora przy znanych wartościach pozostałych rezystorów, lub wartość stosunku rezystancji włączonych w sąsiednich ramionach mostka, przy znanej wartości stosunku dwu pozostałych rezystorów. Minimalny czas pomiaru wynosi $t_o + t_z$, ale można go zwielfokrotnie w celu zmniejszenia pewnych błędów. Zagadnienie to wymaga oddzielnej analizy [3].

Po czasie $t_o + t_z$ ładunek zgromadzony w źródle prądu wynosi 0. Można wtedy rozpocząć kolejny cykl pobierania prądu I_d i dostarczania prądu I_r przez źródło prądowe. Źródło to pracuje więc jak pompa ssąco-tłocząca. Wydaje się, że dobrym określeniem takiego źródła byłaby nazwa „pompa ładunku”.

Chwilową wartość ładunku zgromadzonego w aktywnym źródle prądowym określa napięcie chwilowe na kondensatorze ujemnego sprzężenia zwrotnego, o pojemności C (rys. 4). Przy pobieraniu stałego prądu przez źródło, napięcie na pojemności C narasta liniowo do wartości U_{K0} , a przy oddawaniu prądu stałego zmniejsza się liniowo do wartości U_{Kz} . Wartości napięć na pojemności C , przy których następuje przełączanie źródła mogą być wybrane dowolnie z liniowego zakresu pracy wzmacniacza. Zależności czasowe napięcia na pojemności C w pierwszym i kolejnych cyklach pracy układu przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Napięcie na kondensatorze aktywnego źródła prądu
Fig. 8. Voltage on negative feedback capacitor in active current source

Pierwszy cykl pobierania i oddawania prądu przez źródło jest nieustalony, ponieważ ładunek początkowy zgromadzony na pojemności C jest nieokreślony. W kolejnych cyklach przebiegi są powtarzalne. Przed pierwszym cyklem pracy źródła można by zerować ten ładunek, ale można też opuścić ten cykl i nie mierzyć dla niego stosunku t_o/t_z . Jest to technicznie łatwiejsze. Szczegóły związane z niestałością poziomów przełączania są dyskutowane w innych publikacjach [5, 8].

Przełączanie źródła prądowego i przełączanie rezystancji R_4 pozwala utrzymać zerową wartość napięcia ΔU_{CD} , które jest napięciem wejściowym wzmacniacza, przez cały czas jego pracy w zakresie liniowości.

Utrzymanie zerowej wartości napięcia ΔU_{CD} w układzie, który w obu trybach pracy ma cztery ramiona było główną przesłanką nazwania przedstawionego układu „mostkiem czteroramiennym zrównoważonym”.

Z przedstawionej zasady działania układu wynika, że jest to przetwornik wielkości analogowej (np. rezystancji R_3 lub R_4) na wielkość analogową – czas lub stosunek przedziałów czasu. Dopiero po przetworzeniu przedziałów czasu na liczby, co jest procedurą standardową stosowaną w czasomierzach cyfrowych, można cały tor przetwarzania potraktować jako „przetwornik analogowo-cyfrowy rezystancji”. Nowość problematyki tkwi jednak w przetwarzaniu analogowej wartości rezystancji na analogową wartość czasu, a nie tego czasu na wynik w postaci cyfrowej.

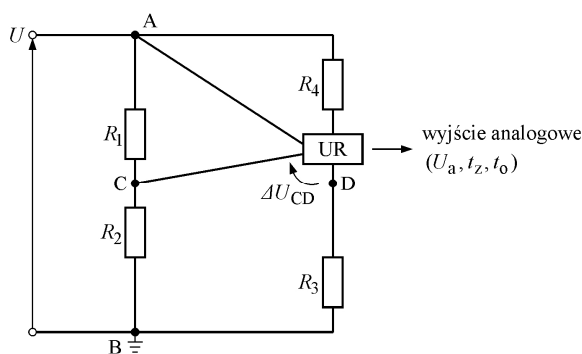
6. Porównanie mostka równoważonego ładunkowo z mostkiem Wheatstone'a

W [3, 4] jest przedstawiony prosty układ realizujący wszystkie funkcje potrzebne do poprawnej pracy mostka równoważonego ładunkowo.

Układ ten:

- dostarcza prąd I_x o zmienianej cyklicznie biegunowości i wartościach spełniających warunek (13),
- zawiera automatyczny układ sterujący przełączaniem rezystancji R_4 ,
- jest detektorem zerowego napięcia ΔU_{CD} ,
- spełnia funkcję układu wykonawczego równoważonego mostek,
- ma wyjście sygnału analogowego U_a , który może być wykorzystany do dalszego przetwarzania na sygnał cyfrowy,
- jest ekwiwalentem nastawnego wielodekadowego rezystora R_4 scalonego z detektorem zerowej wartości napięcia między węzłami C,D mostka.

Na rys. 9 przedstawiono schemat blokowy mostka równoważonego ładunkowo, w którym UR oznacza układ realizujący wszystkie wymienione funkcje.



Rys. 9. Schemat blokowy układu mostka równoważonego ładunkowo
Fig. 9. Block diagram of the charge balanced bridge

W stanie normalnej pracy układu przez cały czas napięcie $\Delta U_{CD}=0$, a na wyjściu układu UR pojawiają się impulsy określające przedziały czasu t_o , t_z , które można wykorzystać do dalszego przetwarzania.

Przykład obliczeniowy

Ma być zmierzona rezystancja R_3 . W układzie zastosowano $R_1=R_2=R_4=1000 \Omega$, przy czym rezystancja R_4 jest kluczowana. Z pomiaru czasów otrzymano: $t_o=0,15010$ s, oraz $t_z=0,05000$ s,

z niepewnością $u(t)=10 \mu\text{s}$ wynikającą z rozdzielczości. Ze wzoru (20) oblicza się surowy wynik pomiaru (przed zaokrągleniem):

$$R_3 = \frac{R_2 R_4}{R_1} \left(1 + \frac{t_o}{t_z} \right) = 4002,000 \dots \Omega \quad (21)$$

Niepewność rezystancji R_3 wynikająca z uwzględnionej niepewności pomiaru czasów wynosi:

$$u(R_3) = \sqrt{\left[\frac{\partial R_3}{\partial t_o} u(t_o) \right]^2 + \left[\frac{\partial R_3}{\partial t_z} u(t_z) \right]^2} = \frac{R_2 R_4}{R_1} \cdot \frac{1}{t_z} \sqrt{\left[\frac{u(t_o)}{t_o} \right]^2 + \left[\frac{u(t_z)}{t_z} \right]^2} \approx 0,67 \Omega \quad (22)$$

Końcowy wynik pomiaru rezystancji: $R_3=(4002,00 \pm 0,67) \Omega$.

Inne składniki niepewności, występujące typowo przy mostkowych pomiarach rezystancji należy uwzględnić w podobny sposób.

Ponieważ równanie równowagi mostka zawiera tylko wartości rezystancji ramion i stosunek czasów, więc zastosowanie znanych procedur przestawienia albo podstawienia przy pomiarach dokładnych jest możliwe. Ponadto bezpośredni pomiar stosunku czasów prowadzi do dalszego zmniejszenia tego składnika niepewności.

7. Podsumowanie i wnioski

Mostek równoważony ładunkowo pozwala dokonać dokładnego pomiaru rezystancji lub przekładni dzielnika rezystancyjnego. Jego równanie równowagi wiąże stosunek czasów z wartościami rezystancji w ramionach. Tak jak w mostku Wheatstone'a, równanie równowagi nie zależy od napięcia zasilania. Mostek taki jest zawsze zrównoważony, o ile wzmacniacz będzie pracował w zakresie liniowości, co jest warunkiem łatwym do spełnienia. Układ należy do najprostszych układów pomiarowych rezystancji, o małej liczbie elementów, dzięki czemu liczba możliwych źródeł niepewności jest niewiele większa, niż w mostku Wheatstone'a. Istotną zaletą układu jest odniesienie wartości mierzony do stosunków przedziałów czasu, które można zmierzyć bardzo dokładnie.

8. Literatura

- [1] Horowitz P., Hill W.: Sztuka elektroniki. WKiŁ, Warszawa, 1996.
- [2] Kester W.: Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning. Section 2: Bridge Circuits. Analog Devices, Inc., 1999, ISBN 0-916550-20-6.
- [3] Skubis T., Tync B.: „Cyfrowe pomiary rezystancji mostkami zrównoważonymi”. PAK nr 12/2004 r., str. 5-8.
- [4] Tync B.: Ładunkowo równoważony układ mostkowy do pomiaru temperatury. Prace Komisji Metrologii PAN (oddz. Katowice), Ustroń 2003, str. 67-78.
- [5] Tync B.: Mostki tybo – ładunkowo równoważone układy jako oryginalne pomiarowe przetworniki analogowo - cyfrowe. PAK nr 3, 2002, str. 21-23.
- [6] Tync B.: Sposób pomiaru rezystancji i układ do pomiaru rezystancji. Patent PL 146 539, 1989 r.
- [7] Tync B.: Sposób pomiaru zmian rezystancji i układ do pomiaru zmian rezystancji. Patent PL 177 467, 1995 r.
- [8] Tync B., Skubis T.: „Analogowo-cyfrowe zrównoważone mostki prądu stałego”. PAK nr 9bis/2007, str. 683-686.
- [9] Warsza Z.L.: „Immitancyjne układy czterobiegunowe (4T) w pomiarach wieloparametrowych”. Wyd. PIAP, Warszawa, 2004 r.