

Elektroniczne niemostkowe układy przetwarzania rezystancji i konduktancji na sygnał cyfrowy

Jacek Korytkowski

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono elektryczne schematy układów konwersji pojedynczej rezystancji i pojedynczej konduktancji na sygnał cyfrowy, możliwe do realizacji przy wykorzystaniu wzmacniaczy monolitycznych oraz przetworników analogowo-cyfrowych. Zaproponowano symbole elementów elektrycznych sterowanych źródeł napięcia i sterowanych źródeł prądu, a także sterowanego napięciowo przetwornika analogowo-cyfrowego. Są to niezbędne elementy elektryczne do tworzenia pełnych końcowych schematów konwerterów rezystancji na sygnał cyfrowy i konwerterów konduktancji na sygnał cyfrowy. Wykazano, że są tylko cztery proste podstawowe schematy tych konwerterów. Omówiono kilka przykładowych schematów elektronicznych układów realizujących funkcje sterowanych źródeł napięcia i sterowanego źródła prądu umożliwiających tworzenie pełnych końcowych schematów elektronicznych konwerterów pojedynczej rezystancji na sygnał cyfrowy i konwerterów pojedynczej konduktancji na sygnał cyfrowy.

Słowa kluczowe: sterowane źródło napięcia, sterowane źródło prądu, wzmacniacz monolityczny, monolityczny przetwornik analogowo-cyfrowy, konwerter rezystancji na sygnał cyfrowy, konwerter konduktancji na sygnał cyfrowy

1. Wprowadzenie

Zastosowania konwerterów rezystancji i konduktancji na sygnał cyfrowy wynikają z potrzeb współczesnych mikroprocesorowych i komputerowych technik pomiarowych oraz technik kontroli właściwości metrologicznych urządzeń automatyki przemysłowej oraz aparatury do pomiarów przemysłowych. Takie konwertery rezystancji i konduktancji mogą stanowić niezbędne wyposażenie testerów mikroprocesorowych oraz komputerowych stanowisk przeznaczonych dla producentów sprzętu, jak i dla użytkowników sprzętu na obiekcie rzeczywistym i w laboratoriach.

Rozwiązania układowe konwerterów rezystancji i konduktancji na sygnał cyfrowy są rzadko opisywane w polskiej literaturze technicznej. Rozwiązania tych konwerterów odbiegają od klasycznych układów pomiaru rezystancji i konduktancji, w których stosuje się stabilizację prądu i pomiar napięcia lub stabilizację napięcia i pomiar prądu [1, 2].

W praktyce przemysłowej dużą grupę układów pomiarowych i układów automatyki stanowią układy z rezystancyjnymi czujnikami temperatury [3]. Głównie stosuje się platynowe rezystancyjne czujniki temperatury Pt 100, Pt 500, Pt 1000, gdyż charakteryzują się dobrą liniowością i stałością charakterystyki w czasie. Są też stosowane rezystancyjne czujniki niklowe Ni oraz czujniki miedziane Cu o gorszych właściwościach metrologicznych. Toteż współczesne testery i stanowiska pomiarowe do kontroli właściwości metrologicznych urządzeń pomiarowych temperatury i ciepła mogą bazować na dokładnych konwerterach rezystancji o wyjściowym sygnale cyfrowym umożliwiającym wyświetlanie wyników pomiarów.

Ważną grupę układów pomiarowych, w których omawiane układy przetwarzania mogą znaleźć zastosowanie są przyrządy pomiarowe dużych rezystancji, zwane megaomomierzami. Służą one do oceny stanu izolacji, parametru bardzo istotnego z punktu widzenia stanu bezpieczeństwa wszystkich urządzeń elektrycznych i elektronicznych. W układach megaomomierzy z wyświetlaniem cyfrowym mogą być stosowane konwertery rezystancji lub konduktancji o wyjściowym sygnale cyfrowym.

Istnieje grupa układów pomiarowych do współpracy z czujnikami elektrolityczno-rezystancyjnymi zwanymi czujnikami konduktometrycznymi [4]. Czujniki te są stosowane do badania stężenia elektrolitu wynikającego z zawartości rozpuszczonego w nim związku chemicznego. Konduktancja czujnika charakteryzuje się w przybliżeniu liniową zależnością od stężenia związku chemicznego w roztworze. Również w tego typu układach pomiarowych stężenia składnika w roztworze, szczególnie w układach z obróbką mikroprocesorową znajdują zastosowanie konwertery konduktancji na sygnał cyfrowy.

Autor korespondujący:

Jacek Korytkowski, jkorytkowski@piap.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 11.01.2016 r., przyjęty do druku 10.02.2016 r.



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

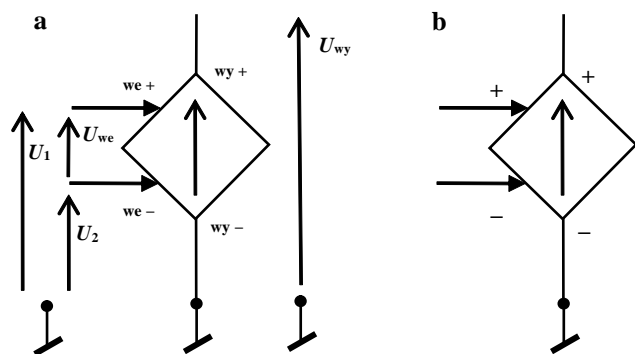
Można wymienić wiele różnych urządzeń przeznaczonych do współpracy z czujnikami rezystancyjnymi i konduktancyjnymi. Są to mierniki i przetworniki cyfrowe oraz inne mikroprocesorowe urządzenia sterowania i pomiarów.

W praktyce pomiarowej stosuje się różne układy z czujnikami rezystancyjnymi i konduktancyjnymi. Pomiary bywają realizowane metodami klasycznymi przy stabilizowaniu napięcia czy prądu zasilania, lub metodami mostkowymi, ale także przez jednoczesny pomiar napięcia i prądu oraz przy stosowaniu odpowiedniego układu dzielącego. Pomiary mostkowe charakteryzują się często zależnościami nieliniowymi. Jest dostępna bogata literatura na temat układów mostkowych [5–7]. Autor nie zajmuje się tu układami klasycznymi ani mostkowymi.

Celem artykułu jest przedstawienie wszystkich możliwych konfiguracji elektronicznych układów konwerterów pojedynczej rezystancji i pojedynczej konduktancji o uziemionym jednym z zacisków na sygnał cyfrowy. Wykazano, że istnieją tylko cztery podstawowe konfiguracje takich konwerterów. Konfiguracje te przedstawiono w postaci schematów elektrycznych zawierających oprócz typowych elementów elektrycznych i przetwornika analogowo-cyfrowego także odpowiednie sterowane źródła napięcia i sterowane źródła prądu.

Obecnie są powszechnie dostępne monolityczne przetworniki analogowo-cyfrowe oraz monolityczne wzmacniacze pozwalające formować w odpowiednich układach sterowane źródła napięcia i sterowane źródła prądu niezbędne do realizacji konwersji rezystancji i konduktancji na sygnał cyfrowy.

W punkcie 2 zostały przedstawione i opisane uproszczone symbole wybranych sterowanych źródeł napięcia i sterowanych źródeł prądu oraz przetwornika analogowo-cyfrowego – niezbędne do realizacji czterech podstawowych układów konwerterów rezystancji i konduktancji na sygnał cyfrowy. W punkcie 3 przedstawiono i omówiono cztery schematy podstawowych konfiguracji układów konwerterów rezystancji i konduktancji na sygnał cyfrowy. W punkcie 4 podano kilka przykładowych schematów elektronicznych układów realizujących funkcje sterowanych źródeł napięcia i prądu umożliwiających tworzenie schematów elektronicznych konwerterów pojedynczej rezystancji na sygnał cyfrowy i konwerterów konduktancji na sygnał cyfrowy.



Rys. 1. Źródło napięcia sterowane różnicowym sygnałem napięciowym; a) symbol z opisem napięć, b) symbol uproszczony
Fig. 1. The voltage source controlled by voltage signal; a) the symbol with voltages description, b) the simple symbol

2. Elementy składowe konwerterów

2.1. Źródło napięcia sterowane różnicowym sygnałem napięciowym

Symbol źródła napięcia sterowanego różnicowym sygnałem napięciowym został podany na rys. 1.

Źródło to ma dwa bieguny wyjściowe „wy+” oraz „wy-”, rezystancja wewnętrzna źródła jest pomijalna (źródło napięciowe idealne), jego biegun „wy-” jest bezpośrednio połączony do wspólnego punktu sygnałowego układu elektrycznego (zwanego w języku angielskim „common”, a w niezbyt trafnej polskiej gwarze technicznej zwanego „masa” lub „ziemia”). Napięcie wyjściowe źródła opisane jest symbolem U_{wy} .

Źródło to ma wejście różnicowe o biegunach „+we” oraz „-we”, do których jest doprowadzone napięcie sterujące U_{we} . Charakterystyka sterowania jest proporcjonalna, została opisana wzorem:

$$U_{wy} = k_U U_{we}, \quad (1)$$

gdzie: k_U – współczynnik wzmocnienia napięciowego wyrażony w jednostkach V/V.

Wejście różnicowe o biegunach sterujących oznaczonych „+we” i „-we” charakteryzuje się pomijalną konduktancją wejściową ($R_{we} \rightarrow \infty$), a do wejścia doprowadzone są napięcia U_1 oraz U_2 , których różnica stanowi sygnał sterujący U_{we} :

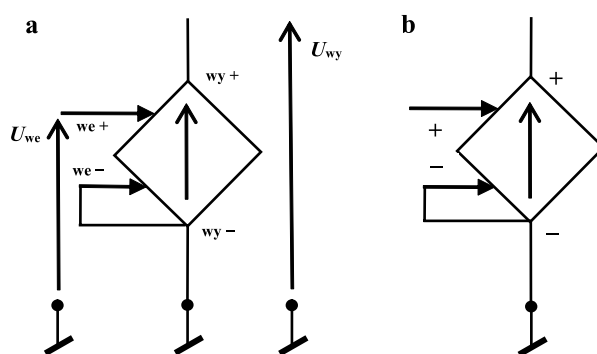
$$U_{we} = U_1 - U_2. \quad (2)$$

Wartość średnia napięcia zwanego napięciem wspólnym wejścia różnicowego:

$$U_{ws} = \frac{1}{2}(U_1 + U_2) \quad (3)$$

nie ma wpływu na wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego k_U sterowanego źródła napięciowego.

Konduktancja wejściowa dla napięcia wspólnego G_{wews} tego źródła sterowanego ma wartość pomijalnie małą ($R_{wews} \rightarrow \infty$).



Rys. 2. Źródło napięcia sterowane sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym; a) symbol z opisem napięć, b) symbol uproszczony
Fig. 2. The voltage source controlled by voltage signal having non-differential input; a) the symbol with voltages description, b) the simple symbol

2.2. Źródło napięcia sterowane sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym

Symbol źródła napięcia sterowanego sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym został podany na rys. 2. Źródło napięcia sterowane sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym jest odmianą poprzednio opisanego źródła, a charakteryzujemy się tym, że biegun sygnału wejściowego „we-” oraz biegun sygnału wyjściowego „wy-” są wewnętrznie zwarte do wspólnego punktu sygnałowego. To powoduje, że napięciowy sygnał wejściowy U_{we} oraz napięciowy sygnał wyjściowy U_{wy} odnoszone są do wspólnego punktu sygnałowego.

Napięcie wyjściowe opisane jest wzorem:

$$U_{wy} = k_U U_{we}. \quad (4)$$

Pozostałe parametry opisywanego źródła są takie same jak poprzedniego źródła sterowanego różnicowym sygnałem napięciowym. Występuje tu pomijalna wartość rezystancji wyjściowej, oraz pomijalna wartość konduktancji wejściowej, przy czym konduktancja wejściowa dla napięcia wspólnego staje się konduktancją wejściową, a więc wartość jej jest pomijalna.

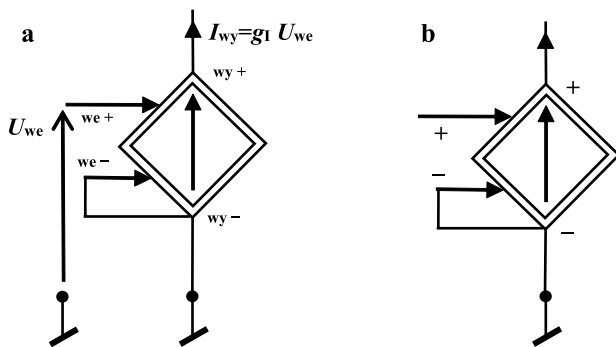
2.3. Źródło prądu sterowane sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym

Symbol źródła prądu sterowanego sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym przedstawiono na rys. 3.

Źródło to ma dwa bieguny wyjściowe „wy+” oraz „wy-”, konduktancja wewnętrzna tego źródła prądu jest pomijalna (źródło prądu idealne $R_{we} \rightarrow \infty$), biegun „wy-” jest bezpośrednio połączony do wspólnego punktu sygnałowego układu. Prąd wyjściowy źródła opisany jest symbolem I_{wy} .

Źródło ma wejście o biegunach „we+” oraz „we-”, przy czym biegun „we-” jest wewnętrznie połączony z biegunem „wy-” źródła prądu łączonym do wspólnego punktu sygnałowego układu. Do bieguna sterującego „we+” oraz do wspólnego punktu sygnałowego doprowadzone jest napięcie sterujące U_{we} . Charakterystyka sterowania jest proporcjonalna i jest opisana wzorem:

$$I_{wy} = g_I U_{we}, \quad (5)$$



Rys. 3. Źródło prądu sterowane sygnałem napięciowym o wejściu nieróżnicowym; a) symbol z opisem napięcia i prądu, b) symbol uproszczony

Fig. 3. The current source controlled by voltage signal having non-differential input; a) the symbol with voltage and current description, b) the simple symbol

gdzie: g_I – współczynnik przetwarzania napięcia wejściowego na prąd wyjściowy wyrażany jednostkami A/V = S (simens).

Konduktancja wejściowa omawianego źródła sterowanego sygnałem napięciowym w zastosowaniach opisanych w dalszej części artykułu nie musi mieć wartości zerowej. Rezystancja wejściowa może przyjmować skończone wartości odpowiednio do wymagań ze strony układu, w którym jest stosowane sterowane źródło prądu.

2.4. Przetwornik analogowo-cyfrowy o napięciowych sygnałach sterującym i referencyjnym

Symbol przetwornika analogowo-cyfrowego o napięciowych sygnałach sterującym i referencyjnym został przedstawiony na rys. 4.

Schemat przedstawia typową wersję przetwornika analogowo-cyfrowego z napięciem wejściowym U_{we} oraz z zewnętrznym napięciem referencyjnym U_{REF} . W monolitycznych przetwornikach analogowo-cyfrowych rezystancja wejściowa dla napięcia referencyjnego U_{REF} przyjmuje niezbyt duże wartości od kilku do kilkudziesięciu kΩ. Rezystancja wejściowa dla napięcia wejściowego U_{we} bywa znacznie większa i wyraża się wielokrotnością MΩ.

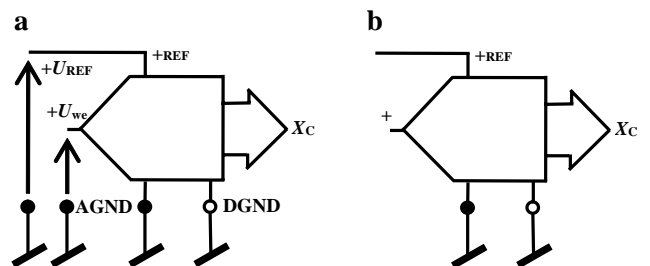
Źródła wejściowego sygnału napięciowego U_{we} oraz zewnętrznego napięcia referencyjnego U_{REF} mają swoje ujemne bieguny łączone z analogowym wspólnym punktem układu AGND (ang. *analogue common*). Sygnały cyfrowe są odnoszone do cyfrowego wspólnego punktu układu DGND (ang. *digital common*), przy czym w monolitycznych przetwornikach analogowo-cyfrowych wymagane jest, by różnica między wspólnym analogowym punktem sygnałowym AGND oraz cyfrowym punktem sygnałowym DGND była mniejsza od 1 V.

Charakterystykę typowego przetwornika analogowo-cyfrowego opisuje równanie:

$$\frac{U_{we}}{U_{REF}} = X_C, \quad (6)$$

gdzie: X_C jest sygnałem cyfrowym.

We współczesnych układach mikroprocesorowych przekazywanie sygnałów cyfrowych odbywa się za pośrednictwem



Rys. 4. Przetwornik analogowo-cyfrowy z wejściowym sygnałem napięciowym oraz z zewnętrznym napięciem referencyjnym; a) symbol z opisem napięć analogowych, b) symbol uproszczony

Fig. 4. The analogue-digital converter having voltage input signal and voltage external reference signal; a) the symbol with voltages description, b) the simple symbol

interfejsów. Stosuje się wiele odmian interfejsów, najczęściej spotykane opisane są w literaturze [8].

W przypadku stosowania interfejsu równoległego w kodzie ułamkowym naturalnym dwójkowym charakterystyka przetwornika będzie opisana równaniem:

$$\frac{U_{we}}{U_{REF}} = (b_{n-1}2^{-1} + b_{n-2}2^{-2} + \dots + b_02^{-n}) \quad (7)$$

gdzie: $b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_0$ – współczynniki dwuwartościowe, zwane stanami poszczególnych bitów, które mogą przyjmować tylko dwie wartości albo 0 lub 1.

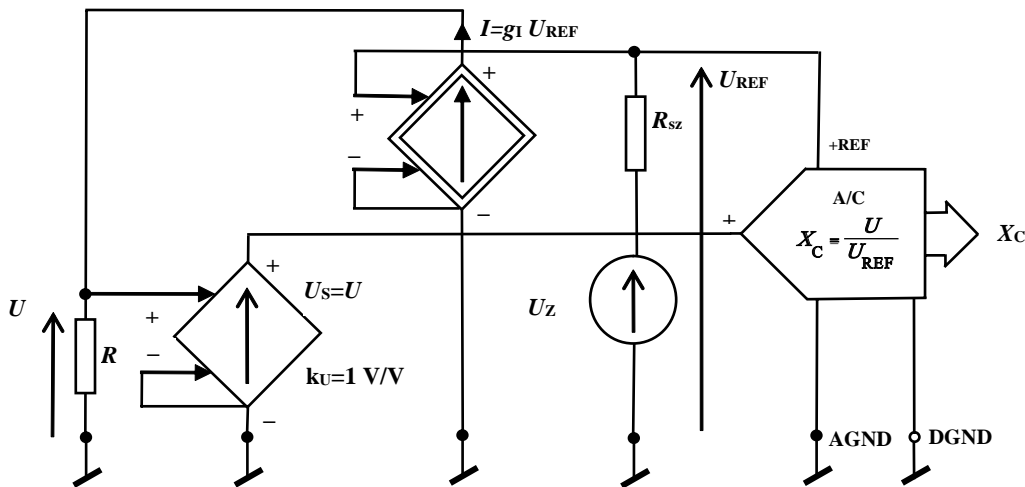
Przetwornik analogowo-cyfrowy wykonuje operację dzielenia dwu sygnałów analogowych: napięcia wejściowego U_{we} i napięcia referencyjnego U_{REF} , co umożliwia realizację konwerterów rezystancji i konwerterów konduktancji na sygnał cyfrowy. Właściwość ta była od dawna wykorzystywana [9] w mostkowych układach pomiarowych rezystancji w celu eliminowania wpływu zmian napięcia zasilania mostka na wynik cyfrowy pomiaru.

3. Podstawowe konfiguracje układów konwerterów

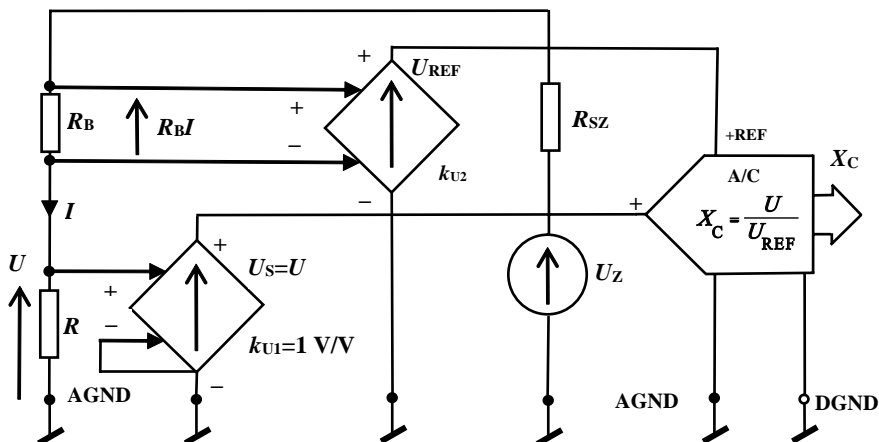
3.1. Konwerter pojedynczej rezystancji R na sygnał cyfrowy XC w układzie z zasilaniem przetwarzanej rezystancji ze sterowanego źródła prądu

Na rys. 5 podany został schemat elektryczny konwertera rezystancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem obwodu rezystancji ze źródła prądowego. Występują tu następujące elementy:

- R – rezystancja przetwarzana na sygnał cyfrowy,
- U_s – źródło napięcia sterowane sygnałem napięciowym U z rezystancji R , źródło to charakteryzuje współczynnik wzmocnienia $k_U = U_s/U = 1 \text{ V/V}$, źródło ma pomijalną wartość konduktancji napięciowego wejścia sterującego,
- I – źródło prądu sterowane sygnałem napięciowym U_{REF} o współczynniku przetwarzania $g_I = I/U_{REF}$ wyrażonym w S (simens),
- U_{REF} – niestabilizowane źródło napięcia o szeregowej rezystancji R_{sz} do ograniczenia prądu w obwodzie,



Rys. 5. Konwerter rezystancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem rezystancji ze sterowanego źródła prądu
Fig. 5. The resistance to digital converter with feed the converted resistance from controlled current source



Rys. 6. Konwerter rezystancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem rezystancji z niestabilizowanego źródła napięcia
Fig. 6. The resistance to digital converter with feed the converted resistance from not-stabilized voltage source

A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy o sygnale wejściowym napięciowym U oraz o sygnale zewnętrznym napięcia referencyjnego U_{REF} i o wyjściowym sygnale cyfrowym X_C . Sygnał wyjściowy przetwornika A/C opisuje równanie:

$$X_C = \frac{U}{U_{REF}} \quad (8)$$

Charakterystykę sterowanego źródła prądu opisuje równanie:

$$I = g_1 U_{REF} \quad (9)$$

wtedy wartość przetwarzanej rezystancji dana jest wzorem:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_{REF} X_C}{g_1 U_{REF}} = \frac{X_C}{g_1} \quad (10)$$

referencyjnego U_{REF} i o wyjściowym sygnale cyfrowym $X_C = U/U_{REF}$.

Sygnał wyjściowy przetwornika A/C opisuje równanie:

$$X_C = \frac{U}{U_{REF}} \quad (11)$$

Charakterystykę sterowanego źródła napięcia U_{REF} opisuje równanie:

$$U_{REF} = k_{U2} R_B I \quad (12)$$

wówczas wartość przetwarzanej rezystancji dana jest wzorem:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_{REF} X_C k_{U2} R_B}{U_{REF}} = k_{U2} R_B X_C \quad (13)$$

3.2. Konwerter pojedynczej rezystancji R na sygnał cyfrowy XC w układzie z zasilaniem przetwarzanej rezystancji z niestabilizowanego źródła napięcia

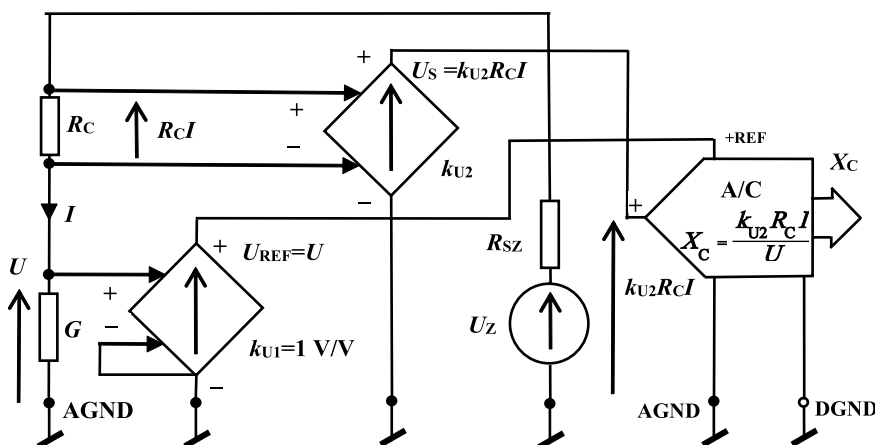
Na rys. 6 przedstawiono schemat elektryczny konwertera rezystancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem obwodu rezystancji z niestabilizowanego źródła napięcia. Na rysunku występują następujące elementy:

- R – rezystancja przetwarzana na sygnał cyfrowy,
- U_z – niestabilizowane napięcie zasilania układu przetwarzania rezystancji R z rezystancją R_{sz} do ograniczenia prądu,
- R_B – rezystor pomiaru prądu I w przetwarzanej rezystancji,
- U_s – źródło napięcia sterowane sygnałem napięciowym U z rezystancji R , źródło to charakteryzuje współczynnik wzmocnienia $k_{U1} = U_s/U = 1$ V/V, źródło ma pomijalną wartość konduktancji dla napięciowego wejścia sterującego,
- U_{REF} – źródło napięcia sterowane napięciem $R_B I$ o wejściach różnicowych „+” oraz „-” o współczynniku wzmocnienia napięciowego $k_{U2} = U_{REF}/R_B I$ wyrażonym w V/V,
- A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy o sygnale wejściowym napięciowym U oraz o sygnale zewnętrznym napięcia

współczynnik przetwarzania $k_{U2} R_B$ ma wymiar: Ω .

Układ konwertera z rys. 6 może mieć odmianę, w której szeregowy rezystor pomiaru prądu R_B może zostać przeniesiony do analogowego wspólnego punktu AGND poniżej szeregowego rezystora przetwarzanego R . Odmiana ta jest jednak bardzo niekorzystna, gdyż w takiej konfiguracji żadna końcówka przetwarzanej rezystancji R nie ma bezpośredniego połączenia ze wspólnym analogowym punktem sygnałowym układu konwertera AGND. Jak wykazano w literaturze [8], w takiej konfiguracji pojawią się zakłócenia od prądu pojemnościowego o częstotliwości sieci zasilającej (50 Hz, 60 Hz). W omawianej odmianie konwertera wzmacnianie sygnałów zakłócających nastąpi przez wewnętrzne wzmacniacze sterowanego źródła napięciowego U_{REF} . Przedstawiony na rys. 6 układ konwertera jest odporny na zakłócające prądy pojemnościowe o częstotliwości sieci zasilającej.

Przedstawiony na rys. 6 układ konwertera ma ograniczony zakres zmienności sygnału wyjściowego wynikający z faktu, że przetworniki analogowo-cyfrowe charakteryzuje ograniczony zakres dopuszczalnej zmienności zewnętrznego napięcia referencyjnego U_{REF} . Tylko nieliczne wykonania przetworników analogowo-cyfrowych (np. AD7798) [10] dopuszczają zmienność napięcia referencyjnego U_{REF} w zakresie od 0,1 V do 2,5 V. Dla układu konwertera rezystancji z rys. 6 przy małej wartości



Rys. 7. Konwerter konduktancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem tej konduktancji ze źródła napięcia
 Fig. 7. The conductance to digital converter with feed the converted conductance from voltage source

rezystancji R_{sz} wystąpi ograniczenie zmienności napięcia wejściowego U znacznie poniżej wartości nominalnej przewidzianej dla przetwornika A/C.

Wady tej nie ma układ konwertera przedstawiony na rys. 5, gdyż wykorzystuje on pełny zakres zmienności napięcia wejściowego przetwornika analogowo-cyfrowego U od 0% do 100% wartości nominalnej, co zapewnia przetwarzanie rezystancji R też w pełnym zakresie.

3.3. Konwerter pojedynczej konduktancji G na sygnał cyfrowy X_C w układzie z zasilaniem przetwarzanej konduktancji z niestabilizowanego źródła napięcia

Na rys. 7 podany został schemat elektryczny konwertera konduktancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem obwodu konduktancji z niestabilizowanego źródła napięcia. Na rysunku występują następujące elementy:

- G – konduktancja przetwarzana na sygnał cyfrowy,
- U_z – niestabilizowane napięcie zasilania układu przetwarzania konduktancji G z rezystancją R_{sz} w celu ograniczenia prądu,
- R_C – rezystor pomiaru prądu I w przetwarzanej konduktancji,
- U_{REF} – źródło napięcia o wejściu nieróżnicowym sterowane sygnałem napięciowym U z konduktancji G , źródło to charakteryzuje współczynnik $k_{U1} = U_{REF}/U = 1$ V/V, źródło ma pomijalną wartość konduktancji napięciowego wejścia sterującego,
- U_s – źródło napięcia sterowane napięciem $R_C I$ o wejściach różnicowych „+” oraz „-” o współczynniku wzmocnienia napięciowego $k_{U2} = U_s/R_C I$ wyrażonym w V/V,
- A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy o sygnale wejściowym napięciowym $U_s = k_{U2} R_C I$ oraz o sygnale zewnętrznym napięcia referencyjnego $U_{REF} = U$ i o wyjściowym sygnale cyfrowym $X_C = k_{U2} R_C I/U$.

Sygnał wyjściowy przetwornika A/C opisuje równanie:

$$X_C = \frac{k_{U2} R_C I}{U} \tag{14}$$

Wartość przetwarzanej konduktancji opisuje wzór:

$$G = \frac{I}{U} = \frac{X_C}{k_{U2} R_C} = \frac{1}{k_{U2} R_C} X_C \tag{15}$$

współczynnik przetwarzania $1/k_{U2} R_C$ ma wymiar: S (simens).

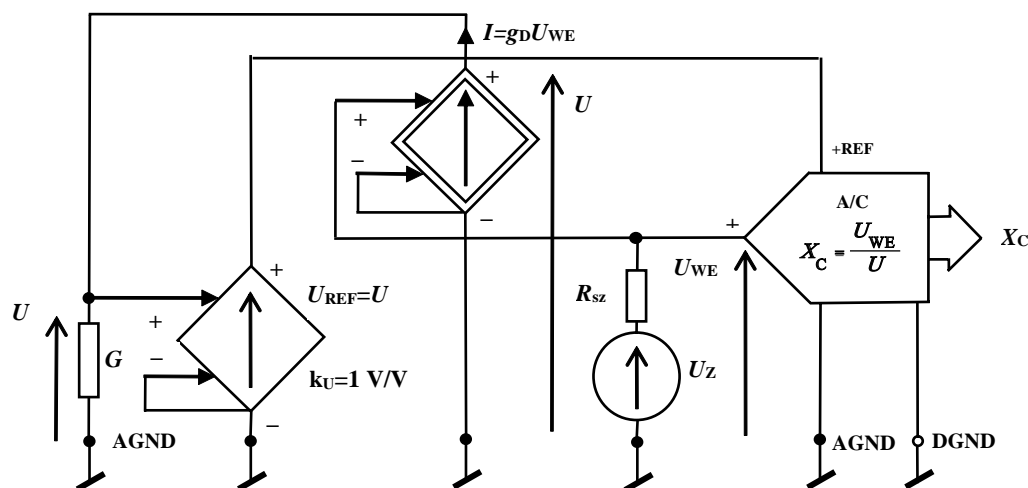
Przedstawiony na rys. 7 układ konwertera jest odporny na zakłócające prądy pojemnościowe o częstotliwości sieci zasilającej, gdyż jedna końcówka przetwarzanej konduktancji G ma bezpośrednie połączenie ze wspólnym analogowym punktem sygnałowym AGND. Z tego powodu odmiana schematu układu, w której rezystor pomiaru prądu R_C zostałby przeniesiony w połączeniu szeregowym w dół poniżej przetwarzanej konduktancji G i dołączony do wspólnego punktu sygnałowego AGND jest niekorzystna.

Dla układu z rys. 7 możliwy zakres zmienności przetwarzanej konduktancji mieści się w przedziale od 0% do 100%.

3.4. Konwerter pojedynczej konduktancji G na sygnał cyfrowy X_C w układzie z zasilaniem przetwarzanej konduktancji ze sterowanego źródła prądu

Na rys. 8 podany został schemat elektryczny konwertera konduktancji na sygnał cyfrowy w układzie z zasilaniem przetwarzanej konduktancji ze sterowanego źródła prądu. Na rysunku występują następujące elementy:

- G – konduktancja przetwarzana na sygnał cyfrowy,
- U_z – niestabilizowane napięcie zasilania układu przetwarzania konduktancji G z rezystancją R_{sz} ograniczającą prąd,
- U_{REF} – źródło napięcia o wejściu nie różnicowym sterowane sygnałem napięciowym U z konduktancji G , źródło to charakteryzuje współczynnik $k_{U1} = U_{REF}/U = 1$ V/V, źródło ma pomijalną wartość konduktancji napięciowego wejścia sterującego,
- I – źródło prądu sterowane napięciem U_{WE} o wejściu nieróżnicowym oraz o współczynniku przetwarzania napięcia U_{WE} na prąd I równym $g_D = I/U_{WE}$ wyrażonym w S (simens),
- A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy o sygnale wejściowym napięciowym U_{WE} oraz o sygnale zewnętrznym napięcia referencyjnego $U_{REF} = U$ i o wyjściowym sygnale cyfrowym X_C .



Rys. 8. Konwerter konduktancji na sygnał cyfrowy z zasilaniem tej konduktancji ze sterowanego źródła prądu
 Fig. 8. The conductance to digital converter with feed the converted conductance from controlled current source

Sygnal wyjściowy przetwornika A/C opisuje równanie:

$$X_C = \frac{U_{WE}}{U} = \frac{I}{g_D U} = \frac{1}{g_D} G \quad (16)$$

Wartość przetwarzanej konduktancji opisuje wzór:

$$G = g_D X_C \quad (17)$$

Przedstawiony na rys. 8 układ konwertera ma ograniczenie zmienności sygnału wyjściowego wynikające z faktu, że przetworniki analogowo-cyfrowe charakteryzuje ograniczony zakres dopuszczalnej zmienności zewnętrznego napięcia referencyjnego U_{REF} . Tylko nieliczne wykonania przetworników analogowo-cyfrowych dopuszczają zmienność napięcia referencyjnego U_{REF} , (np. w zakresie od 0,1 V do 2,5 V [10]), co dla przestawionego układu konwertera zapewnia zmienność przetwarzania wartości konduktancji G od 4% do 100% wartości nominalnej zakresu.

4. Przykładowe schematy układów elektronicznych sterowanych źródeł napięcia i prądu

4.1. Źródła napięcia o wejściu różnicowym sterowane sygnałem napięciowym

Znany jest układ wzmacniacza różnicowego [8, 11] z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi nieodwracającymi, wykorzystujący dwie pary dokładnych rezystorów $2 \times R_1$ oraz $2 \times R_2$ umożliwiających zmianę wzmocnienia w szerokich granicach. Jego schemat został podany na rys. 9a. Ze schematu tego i opisu napięć widać, że może on pełnić rolę źródła napięcia U_{wy} o wejściu różnicowym sterowanego sygnałem napięciowym U_{we} . Jak wynika ze schematów (rys. 6 i 7) sterowane źródło napięcia na swoim wejściu współpracuje ze zmieniającą się rezystancją zastępczą „widzianą” z biegunów wejściowych (zmieniające się R lub G). Z tego powodu należy stosować wzmacniacze monolityczne o bardzo małym prądzie polaryzacji wejść i bardzo dużej rezystancji wejściowej. Linia przerywaną zasygnalizowano możliwość [11]

dołączenia dodatkowego rezystora R_G , którym można nieliniowo zwiększać wzmocnienie, nie naruszając wymaganej idealnej równości wartości rezystancji par rezystorów $2 \times R_1$ oraz $2 \times R_2$.

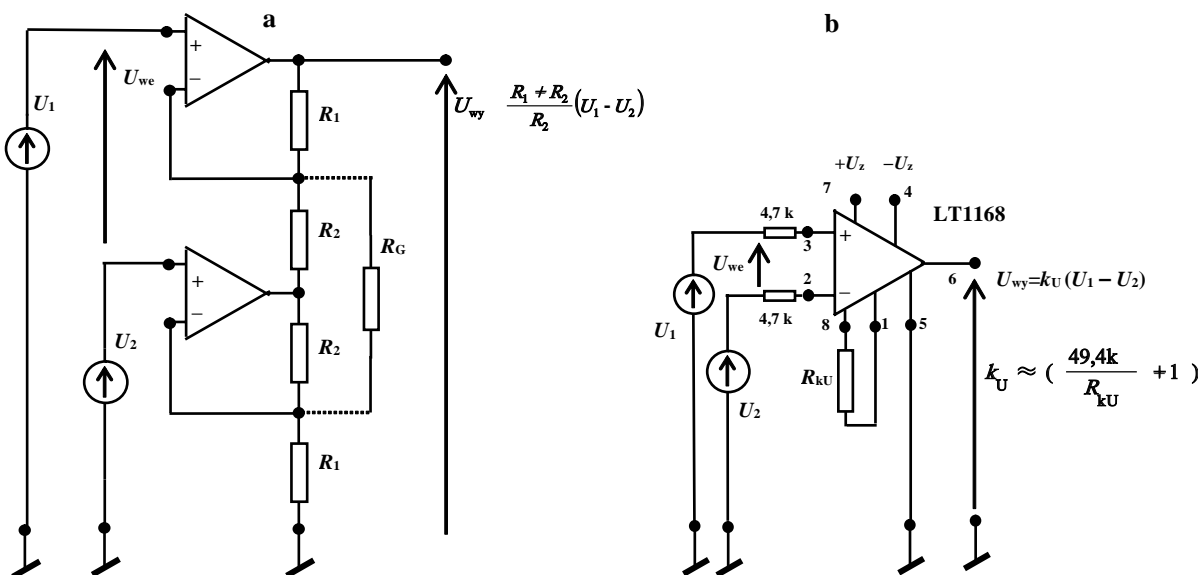
W zastosowaniach współczesnych układ dwu monolitycznych wzmacniaczy i pięciu dokładnych rezystorów jest zastępowany jednym rezystorem i pojedynczym monolitycznym wzmacniaczem specjalizowanym np. typu LT1168 zawierającym w swojej wewnętrznej strukturze trzy wzmacniacze operacyjne oraz laserowo strojone rezystory dokładne. Zaletą tego wzmacniacza specjalizowanego jest to, że wzmocnienie różnicy napięć sygnałów wejściowych jest ustalane tylko jednym zewnętrznym rezystorem dokładnym R_{kU} w szerokim zakresie od 1 V/V do 1000 V/V, a przy wymaganym wzmocnieniu 1 V/V rezystora tego nie ma (przerwa). Rezystory 4,7 kΩ są tanimi rezystorami dla zabezpieczenia wejścia.

Na rys. 9b podano schemat tego wzmacniacza specjalizowanego typu LT1168 opisanego w literaturze [12, 13]. Tego typu wzmacniacze specjalizowane mają bardzo dobre właściwości charakterystyczne dla wzmacniaczy precyzyjnych w zakresie bardzo małych wartości napięć niezrównoważenia, bardzo małych dryftów temperaturowych napięć niezrównoważenia, bardzo małych wartości prądów polaryzacji wejść, bardzo dużych wartości rezystancji wejściowych ($>200 \text{ G}\Omega$) oraz zapewniają bardzo dobrą linowość charakterystyki. Wzmacniacze typu LT1168 są przystosowane do pracy przy napięciach zasilania U_z do $\pm 20 \text{ V}$, i mogą pracować w układach przetwarzania rezystancji przy napięciach do 15 V.

Wzory opisujące charakterystyki sterowania układów (rys. 9a, rys. 10a, rys. 10b) są przybliżone, publikacja [14] zawiera szczegółową analizę tych układów, która umożliwia uzyskanie dokładnych opisów matematycznych charakterystyk uwzględniających szczegółowe parametry wzmacniaczy monolitycznych, takich jak wejściowe napięcia niezrównoważenia i wejściowe prądy polaryzacji wejść wzmacniaczy.

4.2. Źródła napięcia o wejściu nieróżnicowym sterowane sygnałem napięciowym

Przykładowe źródła o wejściu nieróżnicowym sterowane sygnałem napięciowym przedstawiono na rys. 10. Są to powszechnie znane, stosujące jeden wzmacniacz operacyjny, układy wzmacniacza nieodwracającego oraz wtórnika napięcia [11, 14].



Rys. 9. Przykładowe źródła napięcia o wejściu różnicowym sterowane sygnałem napięciowym; a) wzmacniacz różnicowy, b) monolityczny wzmacniacz specjalizowany LT1168

Fig. 9. The exemplar voltage sources with differential inputs controlled by the voltage signal; a) the differential amplifier, b) the monolithic instrumentation amplifier LT1168

4.3. Źródło prądu sterowane sygnałem napięciowym o wejściu nie różnicowym

Na rys. 11 zostało przedstawione przykładowe źródło prądu sterowane sygnałem napięciowym. Podano schemat przetwornika napięcie-prąd z zastosowaniem dwu wzmacniaczy odwracających i kilku rezystorów dokładnych [14]. Znane z literatury przetworniki napięcie-prąd o układzie jednego wzmacniacza stosujące jednocześnie sprzężenia zwrotne, zarówno ujemne jak i dodatnie, charakteryzuje możliwość pojawiania się niestabilnej pracy (wzbudzenia, generacja drgań) przy indukcyjnych lub pojemnościowych obciążeniach na wyjściu. Jest to powodem nie zalecania ich w omawianych układach konwerterów.

Dla układu podanego na rys. 11, po spełnieniu warunku $R_1 = R_2 + R_3$, prąd wyjściowy I_{wy} sterowany sygnałem napięciowym U_{we} niezależnie od rezystancji R czy konduktancji G obciążenia, ale w zakresie liniowej pracy wzmacniacza wyjściowego (bez wchodzenia w stan nasycenia) spełnia zależność opisującą idealne źródło prądu sterowane napięciowo.

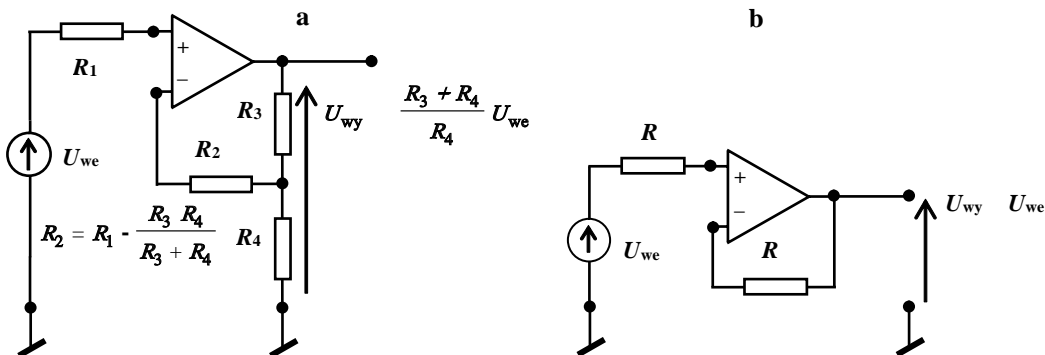
5. Podsumowanie

W artykule opisano właściwości sterowanych źródeł napięcia i prądu oraz przetwornika analogowo-cyfrowego niezbędnych do utworzenia schematów konwerterów rezystancji i konverte-

row konduktancji na sygnał cyfrowy. Stwierdzono, że są tylko cztery podstawowe schematy najprostszych realizacji tych konwerterów oraz przedstawiono i opisano te schematy. Podano kilka przykładowych schematów elektronicznych układów realizujących funkcje sterowanych źródeł napięcia i sterowanego źródła prądu umożliwiających realizację praktyczną elektronicznych konwerterów rezystancji na sygnał cyfrowy i konwerterów konduktancji na sygnał cyfrowy.

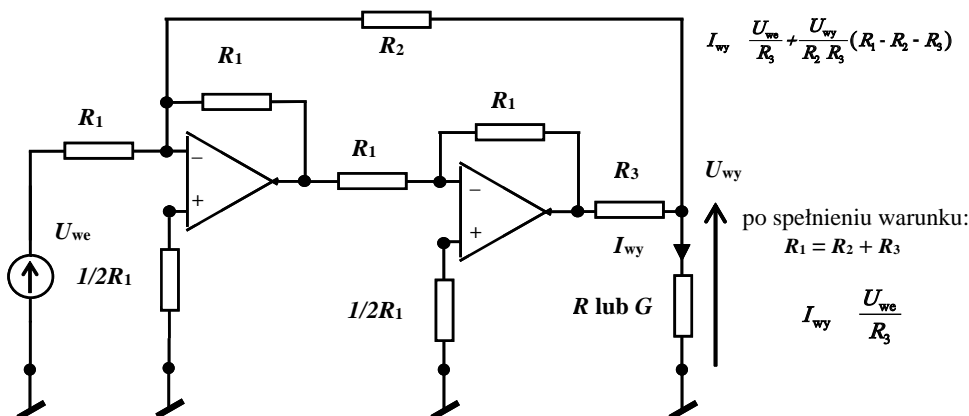
Bibliografia

1. Keithley, *Low Level Measurements Handbook. Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements*. 7th Edition. Keithley, A Tektronix Company. Printed in USA 2013.
2. Lisowski M., *Metody wzorcowania cyfrowych mierników bardzo dużych rezystancji*. „Pomiary Automatyka Kontrola”. Vol. 51, Nr 10, 5–7, 2005.
3. Michalski L., Eckersdorf K., *Pomiary temperatury*. Wydanie trzecie zmienione. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.
4. Moroń Z., *Pomiary przewodności elektrycznej cieczy przy małych częstotliwościach*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 2003.



Rys. 10. Przykładowe źródła napięcia o wejściu nie różnicowym sterowane sygnałem napięciowym; a) wzmacniacz nieodwracający, b) wtórnik napięcia

Fig. 10. The exemplar voltage sources with not differential inputs controlled by the voltage signal; a) the non-inverting amplifier, b) the voltage follower



Rys. 11. Przykładowe źródło prądu o wejściu nieróżnicowym sterowane sygnałem napięciowym

Fig. 11. The exemplar current source with not-differential inputs controlled by the voltage signal

5. Warsza Z.L., *Immitancyjne układy czterobiegunowe (4-T) w pomiarach wieloparametrowych*. Monografia, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa 2004.
6. Warsza Z.L., *Miary dokładności transmitancji mostka rezystancyjnego w przypadkach szczególnych*. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 10/2007.
7. Warsza Z.L., *Nowe ujęcie opisu dokładności mostka z przemysłowymi czujnikami Pt*. Materiały konferencji PPM'08 „Podstawowe Problemy Metrologii w Suchoj Beskidzkiej, 11–14 maja 2008. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Konferencje, nr 8.
8. Korytkowski J., *Elektroniczne symulatory rezystancji i konduktancji w układach pomiarowych*. Oficyna Wydawnicza PIAP. Warszawa 2014.
9. Kester W., *Przetworniki A/C i C/A. Teoria i praktyka*. (tłumaczenie: Nadachowski M., Kręciejewski M., oryginał: Analog-Digital Conversion, 2004 Analog Devices Inc.). Wydanie I. Wydawnictwo BTC Korporacja, 2012.
10. Analog Devices, *3-Channel, Low Noise, Low Power, 16-/24-Bit, Σ - Δ ADC with On-Chip In-Amp AD7798/AD7799*. MA 02062-9106. Analog Devices, Inc. U.S.A. 2005-2007, http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7798_7799.pdf.
11. Nawrocki Z., *Wzmacniacze operacyjne i przetworniki pomiarowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2008.
12. Linear Technology, *LT1168 Low Power, Single Resistor Gain Programmable, Precision Instrumentation Amplifier*. LT/LWI0906 REV A. Linear Technology Corporation 2000, <http://www.linear.com/product/LT1168>.
13. Korytkowski J., *Układ elektroniczny cyfrowego syntezytora konduktancji do symulacji dużych rezystancji*. Pomiary Automatyka Robotyka, kwartalnik nr III /2015.
14. Korytkowski J., *Wzmacniacze monolityczne i metoda analizy elektronicznych układów z tymi wzmacniaczami*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów. Warszawa 2000.

The Electronic Non-bridge Circuits for Conversion Resistance and Conductance to the Digital Signal

Abstract: The object of paper is description the electronic circuit for conversion the resistance and the conductance to digital signal with using the monolithic amplifies and the monolithic analogue-digital converter. There are shown the electric element symbols of the signal controlled voltage sources and the signal controlled current sources and also the voltage controlled analogue-digital converter, the basic electric elements for construction the schemes of the resistance to digital signal converters and the conductance to digital signal converters. There are only four basic schemes of that converters shown on figures. The paper describes the examples of realization the signal controlled voltage sources and signal controlled current source as the basic elements for construction electronic schemes of the resistance to digital converters and schemes of the conductance to digital converters.

Keywords: controlled voltage source, controlled current source, monolithic amplifier, monolithic analogue-digital converter, resistance to digital signal converter, conductance to digital signal converter

dr inż. Jacek Korytkowski, prof. PIAP

jkorytkowski@piap.pl

Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1956 r., doktorat 1972 r., docent 1978 r., prof. nzw. 2010 r. Kierownik Pracowni w Instytucie Elektrotechniki w latach 1962–70. Kierownik Zespołu w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w latach 1970–2007. W okresie 1973–1982 starszy wykładowca i docent na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Jest laureatem kilkunastu nagród za wdrożenia przemysłowe, w tym Zespołowej Nagrody Państwowej 2. stopnia w 1976 r. Ma w swoim dorobku jako autor, współautor lub tłumacz: 9 wydawnictw książkowych, jest autorem lub współautorem 64 publikacji oraz 14 patentów polskich. Jest specjalistą w dziedzinie elektroniki przemysłowej.

