

# Układ elektroniczny cyfrowej syntezy rezystancji do dokładnej symulacji rezystancyjnych czujników temperatury

Jacek Korytkowski

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

**Streszczenie:** W pracy opisano różne zasady działania współczesnych elektronicznych układów symulacji rezystancji oraz omówiono ich wady i zalety. Szczegółowo omówiono opracowany przez autora układ cyfrowej syntezy rezystancji złożony ze wzmacniaczy monolitycznych oraz zawierający cyfrowo sterowany monolityczny przetwornik cyfrowo-analogowy. Podano opis matematyczny charakterystyki rezystancji symulowanej w funkcji sterującego sygnału cyfrowego. Przedstawiono wyniki badań dokładności modelowego układu symulatora rezystancji czujników Pt 100 w przedziale zmian rezystancji od 0  $\Omega$  do 399,9  $\Omega$  oraz czujników Pt 500 w przedziale zmian rezystancji od 0  $\Omega$  do 1999,5  $\Omega$ . Opracowany układ elektroniczny umożliwia symulowanie charakterystyki rezystancji z dużą dokładnością, z błędami poniżej 0,01 % (100 ppm).

**Słowa kluczowe:** wzmacniacz monolityczny, monolityczny przetwornik cyfrowo-analogowy, rezystancyjny czujnik temperatury, symulacja rezystancji

## 1. Wprowadzenie

Dokładne symulatory rezystancji są niezbędne we współczesnych komputerowych i mikroprocesorowych technikach kontroli właściwości metrologicznych sprzętu automatyki przemysłowej i sprzętu pomiarów przemysłowych. Symulatory te stanowią wyposażenie komputerowych stanowisk pomiarowych oraz mikroprocesorowych testerów przenośnych przeznaczonych zarówno dla producentów sprzętu, jak i dla użytkowników sprzętu w laboratoriach lub na obiekcie. Rozwiązania układów tych symulatorów rezystancji były i są nadal opisywane w polskiej literaturze technicznej [1–7].

Ważną w praktyce przemysłowej grupę układów pomiarowych i układów automatyki stanowią układy z wejściowymi rezystancyjnymi czujnikami temperatury [8]. Głównie stosuje się platynowe rezystancyjne czujniki temperatury Pt 100, Pt 500, Pt 1000, gdyż charakteryzują się one dobrą stałością charakterystyki w czasie. Stosowane są też rezystancyjne czujniki niklowe Ni oraz miedziowe Cu o gorszych właściwościach metrologicznych. Dlatego we współczesnych stanowiskach pomiarowych i testerach do kontroli właściwości metrologicznych urządzeń pomiaro-

wych temperatury i ciepła muszą być stosowane dokładne symulatory rezystancji sterowane sygnałem cyfrowym. Wymienia się grupy różnych urządzeń pomiarowych przeznaczonych do współpracy z rezystancyjnymi czujnikami temperatury. Są to: cyfrowe lub analogowe mierniki temperatury, przetworniki pomiarowe temperatury o sygnałach wyjściowych analogowych lub cyfrowych oraz mikroprocesorowe lub analogowe regulatory temperatury.

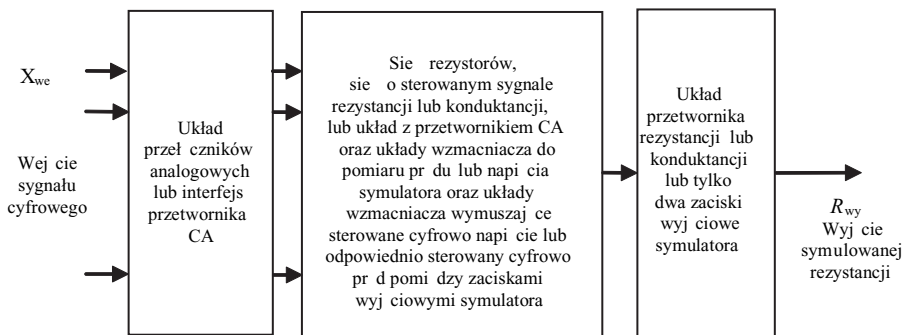
Wiedza o układach cyfrowo sterowanych symulatorów rezystancji jest niezbędna przy konstruowaniu komputerowych stanowisk pomiarowych oraz mikroprocesorowych zestawów do testowania różnorodnych urządzeń pomiarowych i urządzeń automatyki.

Nazwa „syntezator” pojawiła się w ubiegłym wieku i początkowo dotyczyła elektronicznych syntezatorów muzycznych, później komputerowych syntezatorów mowy, a obecnie jest stosowana do elektronicznych bezpośrednich cyfrowych syntezatorów częstotliwości. Te ostatnie – zwane DDS (ang. *Direct Digital Synthesis*) – umożliwiają generowanie sygnałów wielu częstotliwości z jednej częstotliwości odniesienia [9, 10]. Opisywany w artykule układ cyfrowej syntezy rezystancji, wykorzystujący monolityczny przetwornik cyfrowo-analogowy oraz monolityczne wzmacniacze, przez analogię do wymienionej wyżej terminologii, nazwano cyfrowym syntezatorem rezystancji. Syntezator rezystancji umożliwia wytwarzanie cyfrowo sterowanej rezystancji bazując na wartości odniesienia rezystancji rezystora dokładnego i na wartości cyfrowo sterowanego wzmocnienia lub tłumienia sygnału napięciowego lub prądowego w układzie elektronicznym z przetwornikiem cyfrowo-analogowym.

Celem artykułu jest przedstawienie opracowanego układu syntezatora rezystancji o niektórych parametrach lepszych od układów dotychczas opisanych w literaturze.

## 2. Zasada działania symulatorów rezystancji

Schemat blokowy symulatora rezystancji podano na rys. 1 [6]. Wejściowy sygnał cyfrowy  $X_{we}$  o odpowiednim kodzie steruje stanami załączeń układu analogowych przełączników sieci zawierającej dokładne rezystory. Przełączana sieć może



**Rys. 1.** Schemat blokowy symulatora rezystancji  
**Fig. 1.** The resistance simulator block diagram

być zrealizowana w technologii monolitycznej, na przykład przetwornika cyfrowo-analogowego CA. W układzie przedstawionym na rys. 1 realizowane są następujące funkcje:

- zadaje się bezpośrednio wartość rezystancji lub konduktancji między dwoma zaciskami wyjściowymi symulatora;
- zadaje się wartość rezystancji lub konduktancji odpowiednio wzmocnioną lub tłumioną przez aktywny układ wzmacniacza i symuluje się ją między dwoma zaciskami wyjściowymi symulatora;
- odpowiednio steruje się cyfrowo współczynnikiem wzmocnienia napięcia proporcjonalnego do mierzonego prądu na wyjściu symulatora i wymusza się wartość napięcia między dwoma jego zaciskami wyjściowymi, lub steruje się cyfrowo współczynnikiem wzmocnienia prądu proporcjonalnego do mierzonego napięcia na wyjściu symulatora i wymusza wartość prądu między dwoma jego zaciskami wyjściowymi. W obu przypadkach symuluje się wartość rezystancji między dwoma zaciskami wyjściowymi symulatora.

Ze względu na sposób realizacji wyróżnia się trzy grupy symulatorów rezystancji:

- symulatory dwójnikowe bezpośrednie rezystancji;
- symulatory zawierające konwerter lub inwerter impedancji obciążony symulatorem dwójnikowym bezpośrednim rezystancji lub konduktancji;
- symulatory, zwane tu syntezytorami rezystancji, zawierające przetwornik cyfrowo-analogowy CA oraz odpowiednie układy wzmacniające służące do pomiaru prądu symulatora lub pomiaru napięcia symulatora oraz służące do wymuszania odpowiednio sterowanego cyfrowo napięcia lub sterowanego cyfrowo prądu między zaciskami wyjściowymi symulatora.

W pierwszej grupie dwójnikowych symulatorów bezpośrednich wykorzystuje się łączenie szeregowo rezystorów bitowych (o wartościach rezystancji proporcjonalnych do wagi bitów sterujących) odpowiednio włączanych lub zwieranych przełącznikami analogowymi sterowanymi sygnałem cyfrowym. Rezystancja symulatora może zostać opisana wzorem:

$$R_{wy} = 2 R (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + a_4 2^{-4} \dots + a_n 2^{-n}), \quad (1)$$

gdzie:  $2 R$  – pełny zakres rezystancji wyjściowej symulatora o liczbie bitów  $n$ ,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – dwuwartościowe stany

bitów cyfrowego sygnału sterującego. Wartość  $R$  to wartość rezystora najbardziej znaczącego bitu, kolejne bity mają wartości rezystancji dwukrotnie mniejsze ( $R 2^{-1}, R 2^{-2}$  itd.).

Do tej grupy symulatorów dwójnikowych bezpośrednich można zaliczyć również układy wykorzystujące łączenie równoległe rezystorów stanowiących

konduktancje bitowe (o wartościach konduktancji proporcjonalnych do wagi bitów sterujących) odpowiednio włączane lub przerywane przełącznikami analogowymi sterowanymi sygnałem cyfrowym w celu otrzymania cyfrowo sterowanej wartości konduktancji. Symulatory dwójnikowe bezpośrednie są z reguły wykorzystywane w drugiej grupie symulatorów z konwerterami impedancji jako rezystancje obciążenia tych konwerterów. Konduktancja symulatora może zostać opisana wzorem:

$$G_{wy} = 2 G (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + a_4 2^{-4} \dots + a_n 2^{-n}), \quad (2)$$

gdzie:  $2 G$  – pełny zakres konduktancji wyjściowej symulatora o liczbie bitów  $n$ ;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – funkcje dwuwartościowe określające stany bitów cyfrowego sygnału sterującego. Wartość  $G$  to wartość konduktancji rezystora najbardziej znaczącego bitu, kolejne bity mają wartości konduktancji dwukrotnie mniejsze ( $G 2^{-1}, G 2^{-2}$  itd.).

Symulatory dwójnikowe bezpośrednie mają różne wady. Wadą są niepomijalne wartości rezystancji przełączników analogowych (rzędu setek  $m\Omega$ ) w porównaniu do rezystancji włączanych lub zwieranych dokładnych rezystorów stanowiących najbardziej znaczące bity, co jest przyczyną znaczących błędów przetwarzania. Istotną wadą tych symulatorów jest konieczność stosowania aż kilku kosztownych rezystorów dokładnych o niejednakowych, różnych wartościach wynikających z wag najbardziej znaczących bitów.

Należy zauważyć, że stosowanie symulatorów bezpośrednich rezystancji do symulacji czujników Pt 100 jest bardzo nieefektywne z powodu dużych wartości rezystancji przełączników analogowych w stanie zwierania rezystorów wagowych. Przykładowo, można podać, że symulacja rezystancji nieco mniejszej od  $400 \Omega$  przy zwartych pięciu przełącznikach analogowych o rezystancjach po ok.  $400 m\Omega$  wywołuje błąd symulacji ok.  $0,5 \%$  ( $5000 \text{ ppm}$ ). Stosowanie symulatorów bezpośrednich konduktancji do symulacji czujników Pt 100 jest korzystniejsze, gdyż zapewnia błąd symulacji rzędu  $0,05 \%$  ( $500 \text{ ppm}$ ) [5].

W drugiej grupie symulatorów z konwerterami lub inwerterami impedancji stosuje się połączenie kaskadowe dwóch konwerterów ujemnej impedancji, a symulator dwójnikowy bezpośredni zadaje wartość rezystancji obciążenia ostatniego konwertera proporcjonalną do cyfrowego sygnału sterującego. Rezystancja ta jest odpowiednio wzmocniana lub tłumiona i przetwarzana na dodatnią impedancję wejściową pierwszego konwertera, którego zaciski wejściowe są zaciskami symulatora. W tej grupie symulatorów stosować

można znane z elektrotechniki teoretycznej [11] proste, dwa jednowzmacniaczowe konwertery o ujemnej impedancji oznaczane symbolem NIC (ang. *Negative Impedance Converter*). W drugiej grupie symulatorów stosować też można źyrator stanowiący inwerter o dodatniej impedancji (ang. *Positive Impedance Inverter*). W realizacji elektronicznej [11] jest to układ dwuwzmacniaczowy z siedmioma dokładnymi rezystorami w obwodach sprzężeń i obwodach obciążenia wzmacniaczy. Źyrator ma tę właściwość, że jego rezystancja wejściowa jest dodatnia i proporcjonalna do konduktancji obciążenia wyjścia źyratora, tak więc zaciski symulatora stanowią wejście źyratora. W symulatorze tym należy cyfrowo sterować wartością konduktancji zadawanej na wyjściu źyratora.

Wady drugiej grupy symulatorów są takie same jak grupy pierwszej, jednak przy realizacji symulatora z dwoma konwerterami o ujemnej impedancji niezbędna liczba dokładnych rezystorów wzrasta o cztery, a przy realizacji symulatora z układem źyratora liczba dokładnych rezystorów wzrasta o siedem. Przykładowe ceny rezystorów dokładnych podane są w katalogach [12]. Obecnie cena jednego dokładnego rezystora (0,01 %) jest zbliżona swoim rzędem do ceny monolitycznego przetwornika CA o wysokiej rozdzielczości, np. 16 bitów, co świadczy o dużej przewadze rozwiązań cyfrowych syntezytorów należących do grupy trzeciej, gdzie liczba rezystorów dokładnych nie jest duża.

Zaletą drugiej grupy symulatorów jest możliwość zminimalizowania wpływu rezystancji przełączników analogowych przez odpowiednie zwiększenie wartości rezystancji rezystora najważniejszego bitu. Przykładowo, po zastosowaniu w symulatorze bezpośrednim rezystancji rezystora  $R = 20 \text{ k}\Omega$  jako rezystora najważniejszego bitu, oraz po dobraniu 100-krotnego tłumienia w pierwszym konwerterze ujemnej impedancji, uzyskano dla symulacji czujnika Pt 100 błąd charakterystyki nieprzekraczający 0,01 % (100 ppm) [6].

W trzeciej grupie symulatorów są dwie odmiany cyfrowych syntezytorów rezystancji.

Charakterystyczny typ cyfrowego syntezytora rezystancji [3, 4] (nazwany przez autora literatury symulatore) zawiera układ wzmacniacza mierzącego prąd na wyjściu syntezytora oraz zawiera przetwornik CA o sterowanym cyfrowo wzmocnieniu pomierzonego prądu. Przetwornik CA formuje i wymusza napięcie na dwóch zaciskach wyjściowych syntezytora proporcjonalne do pomierzonego prądu i wartości cyfrowego sygnału sterującego. A to powoduje, że syntezywana rezystancja jest proporcjonalna do sygnału cyfrowego i wartości charakterystycznej rezystancji rezystora dokładnego w torze pomiarowym prądu. Rezystancja takiego syntezytora może być opisana wzorem:

$$R_{wy} = R_0 (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + a_4 2^{-4} + \dots + a_n 2^{-n}), \quad (3)$$

gdzie:  $R_0$  – pełny zakres rezystancji wyjściowej symulatora o liczbie bitów  $n$ ,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – dwuwartościowe stany bitów cyfrowego sygnału sterującego.

Wartość  $R_0$  jest proporcjonalna do charakterystycznej rezystancji rezystora dokładnego w torze pomiarowym prądu. Współczynnik proporcjonalności może być korygowany wzmocnieniem wzmacniacza wymuszającego napięcie na zaciskach wyjściowych.

Wadą pierwszej grupy syntezytorów jest brak wspólnego punktu sygnałowego układu elektronicznego (poziomu odniesienia) syntezytora z żadnym z zacisków wyjścia syntezytora. Układ taki jest bardzo podatny na działania zakłócających źródeł, na przykład prądów pojemnościowych o częstotliwości 50 Hz sieci zasilającej. A takie źródła zakłócające często występują między elektronicznym układem urządzenia, dla którego jest symulowana rezystancja, a układem elektronicznym syntezytora.

W trzeciej grupie symulatorów jest druga odmiana syntezytora rezystancji, która została opracowana i opisana przez autora w niniejszym artykule. W ostatnim przypadku cyfrowy syntezytor rezystancji zawiera układ wzmacniacza mierzącego napięcie na wyjściu syntezytora, sterowany cyfrowo przetwornik CA oraz układ wzmacniacza wymuszający prąd między zaciskami wyjściowymi syntezytora. Prąd ten jest proporcjonalny do pomierzonego napięcia, ale jest odwrotnie proporcjonalny do cyfrowego sygnału sterującego. Powoduje to, że syntezywana rezystancja jest proporcjonalna do sygnału cyfrowego i proporcjonalna do wartości charakterystycznej rezystancji rezystora dokładnego zawartego w układzie wymuszającym prąd na wyjściu syntezytora.

Zaletą tej odmiany syntezytora jest wspólny punkt sygnałowy układu elektronicznego syntezytora z jednym z zacisków wyjścia syntezytora. Układ ten jest odporny na działania zakłócających źródeł, a w szczególności na zakłócające prądy pojemnościowe o częstotliwości 50 Hz sieci zasilającej.

### 3. Syntezytor rezystancji z monolitycznym przetwornikiem CA w układzie z sygnałem prądowym wymuszonym na wyjściu syntezytora

Uproszczony schemat syntezytora rezystancji o sygnale prądowym wymuszonym na zaciskach wyjściowych został podany na rys. 2. Elektroniczny układ syntezytora o tej zasadzie działania został opracowany w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP w Warszawie i został oznaczony symbolem ZR213A. Jest to układ aktywny, który wymusza wartość prądu  $I_s$  odbieranego z zacisków wejściowych „1” i „2” syntezytora. Prąd ten ma wartość proporcjonalną do napięcia na zaciskach wejściowych  $U_s$  oraz odwrotnie proporcjonalną do cyfrowego sygnału sterującego  $X_C$ .

Najłatwiej przedstawić fizyczną realizację takiego syntezytora rezystancji jako kaskadowe połączenie:

- wzmacniacza napięciowego  $W_1$  (o nieskończonej dużej wzmocnieniu napięciowym, o pomijalnym napięciu niezrównoważenia na wejściu, o pomijalnej konduktancji wejściowej wzmacniacza) i przetwornika cyfrowo-analo-

gowego CA, które formują sygnał napięciowy  $U_{REF}$  o sterowanym współczynniku wzmocnienia napięcia wejściowego  $U_S$  dzielonym przez wartość sygnału cyfrowego sterującego  $X_C$  według zależności:

$$U_{REF} = \frac{U_S}{X_C}, \quad (4)$$

gdzie:  $X_C = [a_1 \cdot 2^{-1} + a_2 \cdot 2^{-2} + a_3 \cdot 2^{-3} + \dots + a_n \cdot 2^{-n}]$ ;

– oraz przetwornika sygnału napięciowego  $U_{REF}$  na sygnał prądowy  $I_S$  z inwersją, co oznacza, że dla dodatniego napięcia na wejściu przetwornika, sygnał prądowy jest odbierany przez zacisk wyjściowy 1 tego przetwornika. Transmitancja przetwornika napięcia na prąd ma wymiar konduktancji, a jego sygnał wyjściowy opisuje równanie:

$$I_S = \frac{2}{R_S} U_{REF}. \quad (5)$$

Z równań (4) i (5) otrzymamy wzór na rezystancję wejścia opisujący charakterystykę syntezy:

$$R_{we} = \frac{U_S}{I_S} = \frac{R_S}{2} X_C = \frac{R_S}{2} [a_1 \cdot 2^{-1} + a_2 \cdot 2^{-2} + a_3 \cdot 2^{-3} + \dots + a_n \cdot 2^{-n}] \quad (6)$$

gdzie:  $R_S$  to charakterystyczna rezystancja rezystora dokładnego zawartego w układzie przetwornika napięcia na sygnał prądowy.

W układzie został zastosowany monolityczny przetwornik CA typ AD7545A z wbudowaną tak zwaną odwróconą drabinką  $R-2R$  [8]. Wymaga on zastosowania wzmacniacza  $W_2$  równoważącego prądy formowane cyfrowo według sygnału sterującego  $X_C$  z prądem sprzężenia zwrotnego wzmacniacza  $W_2$ , w celu wytworzenia sygnału napięciowego równego  $-U_{REF} X_C$ . Drugi wzmacniacz  $W_3$  pracujący jako dokładny inwerter napięcia formuje nieinwersyjne

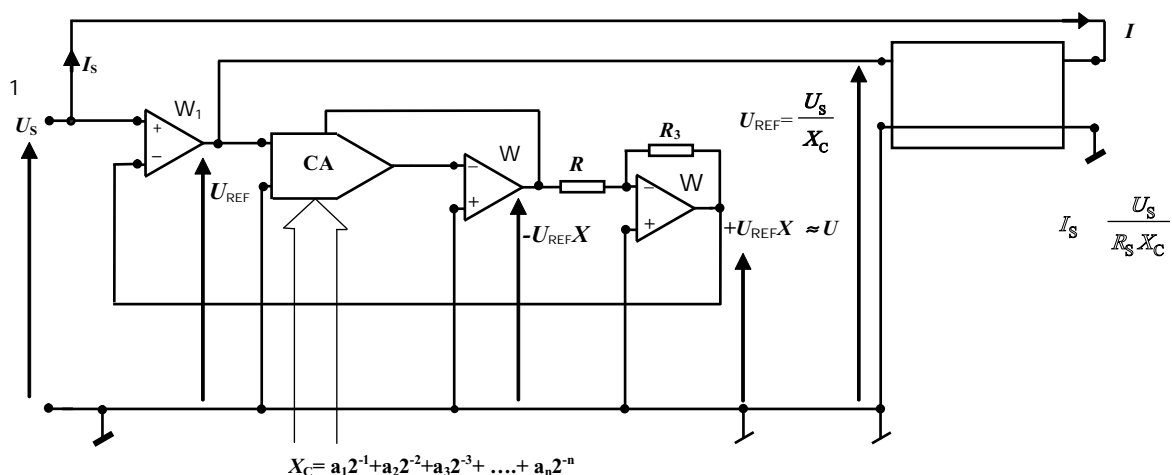
napięcie  $+U_{REF} X_C$ , niezbędne do zrealizowania funkcji sterowanej cyfrowo syntezy rezystancji.

Jak wynika ze schematu (rys. 2), ważną zaletą układu jest wspólny punkt wyjścia syntezy 2 i wspólnego punktu sygnałowego nazywanego AGND całego układu elektronicznego syntezy.

Schemat układu syntezy rezystancji ZR213A dla wykonania o zakresie  $400 \Omega$  (ZR213A400 $\Omega$ ) oraz dla wykonania o zakresie  $2000 \Omega$  (ZR213A2000 $\Omega$ ) został podany na rys. 3.

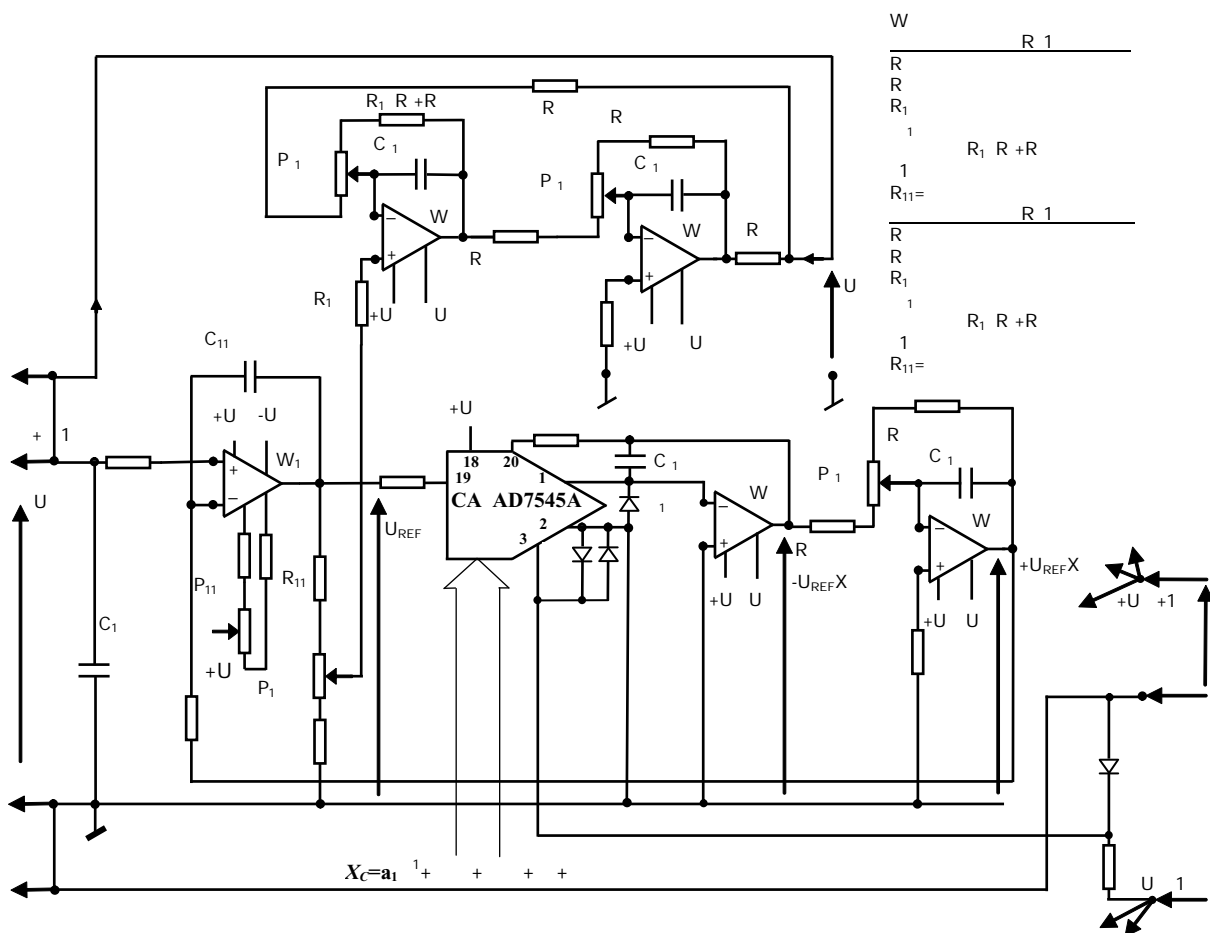
Syntezy ten ma wyjście o połączeniu czteroprzewodowym zwanym też połączeniem Kelvina [13] przystosowanym do bardzo dokładnej symulacji i dokładnych pomiarów rezystancji. Zaciski prądowe oznaczono  $H_{input}$ ,  $L_{input}$ , a napięciowe  $S_{,+}$ ,  $S_{,-}$  zgodnie z oznaczeniem tych zacisków w zastosowanym do pomiarów wysokiej dokładności multimetrze typ 2002 firmy Keithley (względna spodziewana niedokładność jednoroczna ok. 10 ppm na zakresie 2 k $\Omega$ ).

Dla lepszej przejrzystości na schemacie nie umieszczono kondensatorów odprzegających o pojemności 680 nF dołączanych między wspólny punkt AGND do końcówek 7 poszczególnych wzmacniaczy dla dodatnich napięć zasilających  $+U_z$  oraz między wspólny punkt AGND do końcówek 4 poszczególnych wzmacniaczy dla ujemnych napięć zasilających  $-U_z$ . Przetwornik CA typu AD7545A ma doprowadzone tylko dodatnie napięcie zasilające  $+U_z$  na końcówce 18. Dla tego przetwornika zastosowano dwa kondensatory odprzegające o pojemności 680 nF pomiędzy końcówką 18 a AGND oraz pomiędzy końcówką 18 a DGND, stanowiącym wspólny punkt zasilania dla sygnałów cyfrowych. Dla sygnałów cyfrowych przetwornika AD7545A zastosowano osobny wspólny punkt, nazwany DGND, zasilany z dodatkowego napięcia ujemnego o wartości  $-0,5 V$ , a uzyskanego z odpowiednio zasilanej ujemnym napięciem diody krzemowej  $D_4$ . Zapewniło



Rys. 2. Schemat uproszczony syntezy rezystancji z cyfrowo sterowanym sygnałem prądowym wymuszonym na jego zaciskach wyjściowych 1 i 2

Fig. 2. The simple circuits diagram of resistance synthesizer with digital control current signal applied at output points 1 and 2



Rys. 3. Schemat syntezy rezystancji ZR213A

Fig. 3. The schematic of ZR213A resistance synthesizer

to brak zakłócającego działania sygnałów cyfrowych na obwód syntezy rezystancji.

Schemat podany na rys. 3 zawiera układ inwersyjnego przetwornika napięcie-prąd [7]. Układ tego przetwornika zrealizowano na dwóch tanich wzmacniaczach monolitycznych typu OPA277P (Burr-Brown) oznaczonych na schemacie symbolami  $W_2$  oraz  $W_3$ . W układzie tym, przy spełnieniu warunku:  $R_1 = R_2 + R_3$ , prąd wyjściowy  $I_s$  jest niezależny od napięcia  $U_s$  na wyjściu syntezy rezystancji i przy założeniu podanego na schemacie zwrotu prądu, wynikającego z inwersji układu, wartość prądu jest opisana równaniem:

$$I_s = \frac{2kU_{REF}}{R_3}, \quad (7)$$

gdzie  $k \approx 1$  jest współczynnikiem podziału dzielnika na wyjściu wzmacniacza  $W_1$  służącym do strojenia zakresu.

Rezystancja wejściowa układu przetwornika napięcie-prąd jest tak bardzo duża, że układ tego przetwornika nie obciąża wyjścia dzielnika napięcia wzmacniacza  $W_1$ . Zastosowany dzielnik napięcia z wielobrotowym potencjometrem strojeniowym  $P_{12}$  pozwala na bardzo precy-

zyjne zestrojenie zakresu nominalnej rezystancji syntezy rezystancji. Wzmacniacz  $W_1$  jest wzmacniaczem nieinwersyjnym, również o bardzo dużej rezystancji wejściowej, a dzięki współpracy z przetwornikiem CA i ze wzmacniaczami  $W_4$  i  $W_5$  (typ OPA277P), jego współczynnik wzmocnienia napięciowego na wyjściu jest odwrotnie proporcjonalny do cyfrowego sygnału sterującego  $X_c$ . W opisywanym układzie zastosowano zerowanie potencjometrem strojeniowym  $P_{11}$  napięcie nierównoważenia wzmacniacza  $W_1$ , co spowodowało, że napięcie wejściowe wzmacniacza  $U_s$  jest praktycznie równe napięciu sprzężenia zwrotnego zgodnie ze wzorem:

$$U_s = U_{REF} X_c. \quad (8)$$

Przekształcając odpowiednio równania (7) oraz (8) i uwzględniając, że sygnał sterowania cyfrowego jest 12-bitowy, otrzymamy następujący opis charakterystyki symulatora rezystancji:

$$R_{we} = \frac{U_s}{I_s} = \frac{R_3}{2k} [a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_{12} 2^{-12}] \quad (9)$$

**Tab. 1.** Zmierzone wartości błędów względnych nieliniowości charakterystyki syntezy ZR213A400Ω odniesionych do zakresu 400 Ω

**Tab. 1.** Measured values of relative errors nonlinearity characteristics of sustained synthesizer ZR213A400Ω, range to 400 Ω

$R_{we} \Omega$	399,926	350,021	300,012	250,018	200,014	150,017	125,013	100,009	50,007	25,001	12,503	0,0005
$R_{we} \text{ we „-”}$	+60 ppm	+53 ppm	+30 ppm	+45 ppm	+35 ppm	+43 ppm	+33 ppm	+23 ppm	+18 ppm	+3 ppm	+8 ppm	+1 ppm
$R_{we} \Omega$	399,874	349,976	299,978	249,986	200,001	150,001	124,995	100,003	50,007	25,001	12,504	0,0022
$\delta R_{we} \text{ we „+”}$	-70 ppm	-60 ppm	-55 ppm	-35 ppm	+3 ppm	+3 ppm	-13 ppm	+8 ppm	+1 ppm	+3 ppm	+10 ppm	+6 ppm

**Tab. 2.** Zmierzone wartości błędów względnych nieliniowości charakterystyki syntezy ZR213A2000Ω odniesionych do zakresu 2000 Ω

**Tab. 2.** Measured values of relative errors nonlinearity characteristics of sustained synthesizer ZR213A2000Ω, range to 2000 Ω

$R_{we} \Omega$	1999,518	1750,013	1499,988	1250,015	999,987	750,011	499,991	250,021	125,009	62,516	31,265	-0,003
$\delta R_{we} \text{ we „-”}$	+3 ppm	+7 ppm	-6 ppm	+8 ppm	-7 ppm	+6 ppm	-5 ppm	+11 ppm	+5 ppm	+8 ppm	+8 ppm	-2 ppm
$R_{we} \Omega$	1999,466	1749,966	1499,955	1249,986	999,975	749,995	499,987	250,018	125,006	62,513	31,265	0,012
$\delta R_{we} \text{ we „+”}$	-23 ppm	-17 ppm	-23 ppm	-7ppm	-13 ppm	-3 ppm	-7 ppm	+9 ppm	+3 ppm	+7 ppm	+8 ppm	+6 ppm

Syntezyator ma dwa zakresy rezystancji: dla  $R_3 = 800 \Omega$  (wykonanie ZR213A400Ω) zakres  $0 \Omega - 399,902 \Omega$  oraz dla  $R_3 = 4\ 000 \Omega$  (wykonanie ZR213A2000Ω) zakres od  $0 \Omega$  do  $1999,512 \Omega$ .

Jako rezystory zakresowe  $R_1, R_2, R_3, R_4$  zastosowano rezystory dokładne RM67Z, RM70Y, RM43B o współczynnikiem temperaturowym rezystancji nieprzekraczającym  $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  odpowiednio wyselekcjonowane lub korygowane rezystorami równoległymi dla zapewnienia dokładności  $0,05 \%$ . Wieloobrotowe potencjometry strojenkowe  $P_{12}, P_{21}, P_{31}, P_{51}$  służyły do odpowiedniego zestrojenia rezystorów zakresowych oraz zakresu symulowanej rezystancji syntezyatora. Pozostałe rezystory, nie decydujące bezpośrednio o dokładności, były rezystorami o tolerancji  $5 \%$ .

Monolityczne wzmacniacze scalone OPA277P miały sprawdzone niewielkie wartości ( $\pm 2 \mu\text{V}$ ) napięcia niezrównoważenia. W celu zabezpieczenia przed przepięciami obwodów wyjściowych przetwornika CA, na jego końcówkach 1, 2 oraz 3 zastosowano, jako diody ograniczające napięcia  $D_1, D_2, D_3$ , złącza kolektor-baza tranzystorów BC107 o dość wysokim napięciu ograniczenia ok.  $680 \text{ mV}$ , znacznie wyższym od dodatkowego ujemnego napięcia zasilania ( $-0,5 \text{ V}$ ) DGND.

Dla zapewnienia stabilnej pracy układu wzmacniaczy objętych ujemnymi sprzężeniami zwrotnymi, zastosowano jako ujemne sprzężenie dynamiczne kondensatory o pojemnościach  $33 \text{ pF}$  lub  $10 \text{ nF}$ . Poziom szumów zminimalizowano na zaciskach symulatora równolegle do nich dołączono kondensator o pojemności ok.  $300 \text{ nF}$  typu KSF/63 V o pomijalnej upływności.

Po uruchomieniu układów dokonano sprawdzenia charakterystyk stosując multimetr cyfrowy typ 2002 firmy Keithley. Wyniki badania charakterystyki układu syntezyatora ZR213A400Ω przeznaczonego do symulacji czujników termorezystancyjnych Pt 100 o nominalnym zakresie zmian rezystancji od  $0 \Omega$  do  $399,902 \Omega$  podano w tab. 1. Są to dwie charakterystyki dla ujemnych oraz dla dodatnich napięć wejściowych między zaciskami 1 oraz 2. Dla ujemnych napięć wejściowych wyniki oznaczono we „-”, a dla dodatnich napięć wejściowych wyniki oznaczono we „+”.

Wyniki badania charakterystyki układu syntezyatora przeznaczonego do symulacji czujników termorezystancyjnych Pt 500 o nominalnym zakresie zmian rezystancji od  $0 \Omega$  do  $1999,512 \Omega$  podano w tab. 2. Są to dwie charakterystyki dla ujemnych („-”) oraz dla dodatnich („+”) napięć wejściowych między zaciskami 1 oraz 2.

## 4. Podsumowanie

W opisanym układzie 12-bitowego syntezy ZR213A400Ω uzyskano błędy względne charakterystyki nieprzekraczające 70 ppm (0,007 %), odniesione do zakresu nominalnego 400 Ω wartości rezystancji. Natomiast w układzie 12-bitowego syntezy ZR213A2000Ω uzyskano błędy względne charakterystyki nieprzekraczające 30 ppm (0,003 %), odniesione do zakresu nominalnego 2000 Ω wartości rezystancji. Układ opisanego syntezy umożliwia symulowanie temperatury czujników rezystancyjnych Pt 100 z błędem nieliniowości charakterystyki około 0,07 °C, a czujników rezystancyjnych Pt 500 z błędem nieliniowości charakterystyki około 0,03 °C. Zaletą tego syntezy jest wspólny punkt sygnałowy AGND jego układu elektronicznego z wyjściem syntezy oznaczonym S<sub>„-”</sub> (2), co zapewnia odporność na działania przez pojemności zakłócających źródeł prądowych o częstotliwości 50 Hz sieci zasilającej.

## Bibliografia

1. Bartoszewski J., *Sterowany symulator czujników termorezystancyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
2. Korytkowski J., *Układy przetworników cyfrowo-analogowych napięcia, prądu i rezystancji oraz metoda ich analizy*, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa 2004.
3. Szmytkiewicz J., *Elektroniczny symulator rezystancji*, II Konferencja Naukowa KNWS'05 „Informatyka – sztuka czy rzemiosło”, Złotniki Lubąskie 2005.
4. Szmytkiewicz J., *Adjustacja kalibratorów rezystancji*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola”, nr 6 bis 2006, 103–105.
5. Bartoszewski J., Dusza D., *Sterowany cyfrowo symulator czujników termorezystancyjnych*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, nr 2/2008, 14–18.
6. Korytkowski J., *Cyfrowo sterowane symulatory rezystancji i konduktancji – przegląd, opisy działania, przykłady rozwiązań*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, nr 2/2008, 6–13.
7. Korytkowski J., *Liniowe i nieliniowe układy ze wzmacniaczami monolitycznymi w urządzeniach pomiarowych*, Oficyna Wydawnicza PIAP, Warszawa 2011.
8. Korytkowski J., *Układy przetwarzania cyfrowo-analogowego oraz właściwości scalonych przetworników CA*, Oficyna Wydawnicza PIAP, Warszawa 2012.
9. Przybysz R., *Cyfrowa regulacja amplitudy sygnału wyjściowego z układu cyfrowej syntezy częstotliwości*, „Elektronika – Konstrukcje, Technologie, Zastosowania”, nr 7/2011.
10. Kester W., *Przetworniki A/C i C/A. Teoria i praktyka*. (tłumaczenie: Nadachowski M., Kręćiejewski M., oryginał: Analog-Digital Conversion, 2004 Analog

Devices Inc.). Wydanie I. Wydawnictwo BTC Korporacja, 2012.

11. Mikołajuk K., *Podstawy analizy obwodów energo-elektronicznych*. PWN. Warszawa 1998.
12. ELFA DISTRELEC: Metalizowane rezystory foliowe 0,01 %. [www.elfaelektronika.pl/elfa3-pl\\_pl/elfa/init.do?toc=20011&name=Metalizowane+rezystory+foliowe+0%2C01%25](http://www.elfaelektronika.pl/elfa3-pl_pl/elfa/init.do?toc=20011&name=Metalizowane+rezystory+foliowe+0%2C01%25).
13. Pease R. A., *Projektowanie układów analogowych. Poradnik praktyczny*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2005. ■

### Digital controlled resistance synthesis electronic circuit for precise simulation of thermo-resistance sensors

**Abstract:** Principles of simulators operation are described and simulator advantages or demerits are discussed. The paper describes the new electronic circuit for digital controlled resistance synthesis including monolithic amplifiers and monolithic digital-analogue converter. On fig. 3 it is shown the electronic schematic of this digital controlled resistance synthesizer. It was formulated equation as the characteristic description of this resistance synthesizer. The experimental examination results of synthesizer model for sensors Pt 100 at the range from 0 Ω to 399,9 Ω and the results of synthesizer model for sensors Pt 500 at the range from 0 Ω to 1999,5 Ω are described. The elaborated electronic circuit of resistance synthesizer have very good qualities of resistance characteristic accuracy, it is better than 0,01 % (100 ppm).

**Keywords:** monolithic amplifier, monolithic digital-analogue converter, thermo-resistance sensor, resistance simulation

#### dr inż. Jacek Korytkowski, prof. PIAP

Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w roku 1956, doktorat 1972, docent 1978, prof. nzw. 2010. Kierownik Pracowni w Instytucie Elektrotechniki 1962–70. Kierownik Zespołu w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w latach 1970–2007. W okresie 1973–1982 starszy wykładowca i docent w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego 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: 8 wydawnictw książkowych, jest autorem lub współautorem 59 publikacji oraz 14 patentów polskich. Jest specjalistą w dziedzinie elektroniki przemysłowej.

e-mail: [jkorytkowski@piap.pl](mailto:jkorytkowski@piap.pl)

