

Cyfrowo sterowane symulatory rezystancji i konduktancji – przegląd, opisy działania, przykłady rozwiązań

▶ Jacek Korytkowski

Opisano budowę symulatorów rezystancji i konduktancji, dzieląc je wg zasady działania na trzy charakterystyczne grupy. Podano opisy przykładów ich rozwiązań technicznych. Omówiono wyniki badań dokładności symulatorów.

Wdobie dominacji układów mikroprocesorowych, do budowy elektronicznych urządzeń automatyki i pomiarów oraz urządzeń testujących powszechnie stosuje się przetworniki cyfrowo-analogowe. Takie przetworniki o wyjściach prądowych i napięciowych od dawna szczegółowo opisywano w literaturze. Układy przetworników cyfrowo-analogowych, których wielkością wyjściową jest symulowana rezystancja, są tu nazwane symulatorami rezystancji. Rozwiązania układów tych symulatorów są rzadko opisywane w ogólnodostępnej literaturze technicznej [1] i dlatego autor postanowił zapoznać z nimi Czytelników PAR.

Znaczącą w praktyce przemysłowej grupę układów pomiarowych i układów automatyki stanowią układy z wejściowymi rezystancyjnymi czujnikami temperatury. Powszechnie stosuje się platynowe rezystancyjne czujniki temperatury Pt 100, Pt 500, Pt 1000, gdyż charakteryzują się one dobrą stałością charakterystyki w czasie. Stosowane są także rezystancyjne czujniki niklowe Ni oraz miedziowe Cu o gorszych właściwościach metrologicznych. Z tego powodu współczesne stanowiska pomiarowe i testery do kontroli właściwości metrologicznych urządzeń pomiarowych temperatury i ciepła muszą stosować dokładne symulatory rezystancji sterowane sygnałem cyfrowym. Można wyodrębnić 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, mikroprocesorowe lub analogowe regulatory temperatury oraz dość liczne mikroprocesorowe ciepłomierze stosowane do rozliczeń zużycia energii cieplnej. Mają one dwa wejścia przystosowane do dołączenia dwu rezystancyjnych czujników Pt 100 lub Pt 500, mierzących temperaturę zasilania oraz temperaturę powrotu medium grzejącego lub chłodzącego dany obiekt.

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

Od symulatorów rezystancji przeznaczonych do urządzeń testujących wymaga się dużej dokładności. Toteż przetworniki cyfrowo-analogowe, stanowiące symulatory rezystancji, przetwarzają z dużą dokładnością wypracowane w układach mikroprocesorowych sygnały cyfrowe na analogowe wartości rezystancji. Do ich budowy stosuje się odpowiednie elektroniczne przełączniki analogowe, zestawy precyzyjnych rezystorów oraz układy liniowych wzmacniaczy monolitycznych.

Warto zastanowić się, z jaką dokładnością powinny być zadawane rezystancje w układach symulatorów przeznaczonych do wzorcowania cyfrowych mierników temperatury, przetworników pomiarowych i mikroprocesorowych regulatorów temperatury z wejściami przystosowanymi do rezystancyjnych czujników temperatury typu Pt 100 lub Pt 500. Zazwyczaj wymaga się symulacji temperatury z dokładnością do 0,1 % zakresu jej zmian. Przy symulacji czujnika temperatury Pt 100 w zakresie 0...100 °C odpowiada to dopuszczalnemu błędowi symulacji 0,1 °C, a to stanowi ok. 40 mΩ dla czujnika Pt 100 lub ok. 200 mΩ dla czujnika Pt 500 i jest względnym dopuszczalnym błędem symulacji rezystancji o wartości ok. 0,04 %.

Dopuszczalne błędy symulatorów czujników rezystancyjnych dla stanowisk do legalizacji ciepłomierzy do wody są wielokrotnie mniejsze. Toteż obecnie symulatory rezystancji czujnika temperatury zasilania i czujnika temperatury powrotu, stosowane w tych stanowiskach, wykorzystują sterowane cyfrowo elektromechaniczne serwomechanizmy położenia. Serwomechanizmy te ustawiają w odpowiednich położeniach styki specjalnych przełączników o nieznacznej rezystancji w stanie przewodzenia (ok. 2 mΩ). Tym sposobem serwomechanizmy te powodują przyłączenie do wyjścia odpowiedniego precyzyjnego rezystora o wymaganej rezystancji.

▶ *doc. dr inż. Jacek Korytkowski*

Zasada działania symulatorów

Schemat blokowy symulatora rezystancji podano na rys. 1. Wejściowy sygnał cyfrowy X_{we} o odpowiednim kodzie steruje stanami załączeń układu analogowych przełączników sieci precyzyjnych rezystorów. Realizuje się następujące funkcje:

- zadawania wartości rezystancji lub konduktancji na dwu nieobciążonych zaciskach wyjściowych
- zadawania wartości rezystancji odpowiednio wzmacnionej lub tłumionej przez wyjściowy układ przetwornika i symulowania jej na dwu zaciskach wyjściowych symulatora albo
- odpowiedniego sterowania współczynnikiem wzmacnienia prądu proporcjonalnego do napięcia na wyjściu symulatora i wymuszania wartości prądu na jego dwu zaciskach wyjściowych, symulując dzięki temu rezystancję na tych zaciskach.

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

- symulatory dwójnikowe rezystancji lub konduktancji
- symulatory stosujące konwertery lub inwertery impedancji
- symulatory stosujące cyfrowe sterowanie i wymuszanie prądu wyjściowego proporcjonalnego do napięcia wyjściowego.

W pierwszej grupie dwójnikowych symulatorów stosuje się połączenie szeregowo rezystorów bitowych (o wartościach w układzie dwójkowym) odpowiednio włączanych lub zwieranych kluczami sterowanymi sygnałem cyfrowym. W tej grupie symulatorów dwójnikowych można stosować też równoległe łączenie rezystorów, stanowiących konduktancje bitowe odpowiednio włączane lub przerywane kluczami sterowanymi sygnałem cyfrowym dla otrzymania odpowiedniej wartości konduktancji.

W drugiej grupie symulatorów z konwerterami lub inwerterami impedancji, stosuje się połączenie kaskadowe dwu konwerterów ujemnej impedancji, a sieć rezystorów zadaje wartość rezystancji obciążenia ostatniego z nich proporcjonalną do cyfrowego sygnału sterującego. Rezystancja ta jest odpowiednio wzmacniana lub tłumiona i przetwarzana na dodatnią impedancję wyjściową pierwszego konwertera, którego zaciski wyjściowe są zaciskami symulatora. W tej grupie symulatorów wykorzystywać można znane z elektrotechniki teoretycznej [2, 3] proste, jednowzmacniaczowe konwertery ujemnoimpedancyjne oznaczane symbolem

NIC (*Negative Impedance Converter*) [4]. W tej grupie symulatorów stosować też można zyrator, stanowiący inwerter dodatnioimpedancyjny PIV (*Positive Impedance Inverter*) [2]. W realizacji elektronicznej [3] jest to układ dwuwzmacniaczowy z siedmioma dokładnymi rezystorami w obwodach sprzężeń i obwodach obciążenia wzmacniaczy. Żyrator ma tę właściwość, że jego rezystancja wejściowa jest dodatnia i proporcjonalna do konduktancji obciążenia wyjścia zyratora, tak więc zaciski symulatora stanowią wejście zyratora. W symulatorze tym należy cyfrowo sterować wartością konduktancji zadawanej na wyjściu zyratora.

W trzeciej grupie symulatorów z cyfrowym sterowaniem i wymuszaniem prądu wyjściowego, sieć rezystorów odpowiednio steruje współczynnikiem wzmacnienia prądu wyjściowego wzmacniacza. Prąd ten jest proporcjonalny do napięcia mierzonego na zaciskach symulatora oraz odwrotnie proporcjonalny do sterującego sygnału cyfrowego i wymuszany na zaciskach symulatora. W symulatorach tych należy cyfrowo sterować odwrotnością wzmacnienia wymuszanego prądu. Z powodzeniem można stosować do sterowania wzmacnienia najdokładniejsze układy dzielników rezystancyjnych R-2R lub dzielników rezystancyjnych BCD w kodach 8421 lub 2421 [1].

Symulatory dwójnikowe

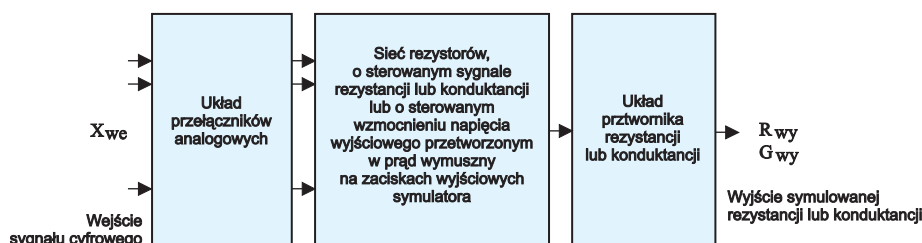
Są to najprostsze układy złożone z rezystorów o bitowych wartościach rezystancji lub konduktancji oraz przełączniki analogowe sterowane sygnałem cyfrowym, które odpowiednio łączą te rezystory. Na rys. 2 podano schemat dwójnikowego symulatora rezystancji. Rezystancję wyjściową takiego symulatora, po zastosowaniu naturalnego dwójkowego kodu ułamkowego, opisuje wzór:

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

gdzie: $2R$ – pełny zakres rezystancji wyjściowej symulatora o liczbie bitów n

a_1, a_2, \dots, a_n – funkcje dwuwartościowe określające stany bitów cyfrowego sygnału sterującego.

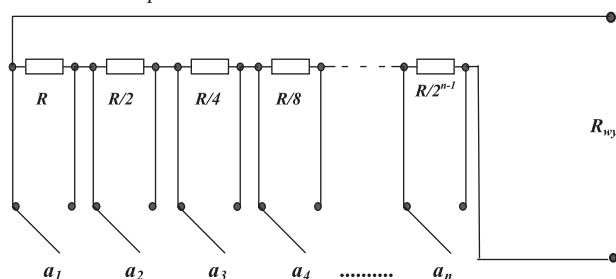
Podany układ symulatora rezystancji rzadko wykorzystywano w praktyce, gdyż charakteryzują go duże systematyczne błędy, wynikające z niepomiąlności wartości rezystancji styków przełączników analogowych i dochodzące do wartości n razy rezystancja przewodzenia przełącznika analogowego R_{pp} . Obecnie niektóre wykonania przełączników analogowych – w tym tranzystorów unipolarnych Power MOSFET – charakteryzuje rezystancja przewodzenia R_{pp} nawet rzędu 20 mΩ. Największy błąd symulatora



Rys. 1. Schemat blokowy symulatora rezystancji lub konduktancji

występuje przy wszystkich zwartych przełącznikach analogowych, a więc przy symulacji rezystancji równej zero. Błąd ten można określić wzorem: $nR_{pp}100\%/2R$. Na przykład dla wartości $n=10$, $R=20000\ \Omega$ oraz $R_{pp}=0,4\ \Omega$ błąd ten wyniesie tylko 0,01 %.

Autor wykonał model układu symulatora dwójnikowego rezystancji wg schematu z rys. 2 o parametrach $n=10$, $R=20\ \text{k}\Omega$ oraz użył tanich tranzystorów unipolarnych Power MOSFET typu IRFD120 firmy International Rectifier jako przełączników analogowych sterowanych sygnałem cyfrowym. Z badań eksperymentalnych wynikało, że rezystancja w stanie przewodzenia przełącznika zawierającego dwa tranzystory wynosiła $R_{pp}=0,4\ \Omega$, a rezystancja w stanie otwartym wynosiła $R_{op}=2\cdot 10^8\ \Omega$.



Rys. 2. Schemat dwójnikowego symulatora rezystancji

Błąd względny symulowanej rezystancji, odniesiony do górnej granicy zakresu 40 kΩ, w całym zakresie nie przekraczał 0,009 %. Tab. 1 podaje wyniki badań modelu symulatora wykonanego wg schematu podanego na rys. 2.

Tab. 1. Zmierzone wartości błędów bezwzględnych w kilku punktach charakterystyki symulatora

$R_{wy} (\Omega)$	10 000	20 000	30 000	35 000	37 500	38 750	39 961
$\Delta R_{wy} (\Omega)$	+3,6	+2	+1	+0,3	-0,3	-0,8	-3,3

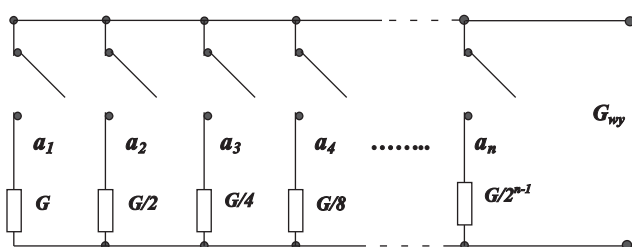
Na rys. 3 podano schemat dwójnikowego symulatora konduktancji.

Konduktancję wyjściową takiego symulatora, po zastosowaniu kodu ułamkowego naturalnego dwójnikowego, można wyrazić wzorem:

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

gdzie: $2G$ - pełny zakres konduktancji wyjściowej symulatora o liczbie bitów n

a_1, a_2, \dots, a_n - funkcje dwuwartościowe określające stany bitów cyfrowego sygnału sterującego.



Rys. 3. Schemat dwójnikowego symulatora konduktancji

Podany układ symulatora konduktancji jest bardzo często wykorzystywany w praktyce, gdyż błędy wynikające z niepomijalnej wartości rezystancji przewodzenia przełączników analogowych mogą być minimalizowane odpowiednim zmniejszeniem rezystancji rezystorów bitowych o konduktancjach $G2^{-k}$, gdzie k to numer kolejnego bitu. Minimalizacja ta jest możliwa tylko w procesie wzorcowania symulatora, więc nie daje wyniku przy zmianach czasowych rezystancji przewodzenia przełączników analogowych w trakcie eksploatacji symulatora. Dlatego przy stosowaniu jako przełączników analogowych przełączników elektromagnetycznych (w tym kontaktronów), trzeba o tym pamiętać.

Dla tego układu symulatora warto rozważyć wpływ rezystancji R_{op} przełącznika analogowego w stanie otwarcia (nieprzewodzenia). Dla tranzystorów unipolarnych może ona przyjmować wartości $10^8\ \Omega$ [1]. Nie trudno zauważyć, że największy błąd symulatora wystąpi przy wszystkich otwartych przełącznikach analogowych, a więc przy symulacji konduktancji równej zero. Błąd ten można określić wzorem: $n100\%/R_{op}2G$. Na przykład dla wartości $n=12$ oraz $G=1,25\cdot 10^{-3}\ \text{S}$ błąd wyniesie 0,005 %.

Symulatory rezystancji wykorzystujące układy wzmacniaczowe konwerterów impedancji

Czwórnik elektryczny opisują równania łańcuchowe o postaci:

$$U_1 = AU_2 + BI_2 \quad (3)$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2 \quad (4)$$

Konwertery impedancji są to czwórniki aktywne, służące do proporcjonalnego przetworzenia impedancji obciążenia. Aby spełniać tę rolę, macierz łańcuchowa konwertera musi mieć parametry $B=0$ oraz $C=0$. Dzięki temu impedancja wejściowa konwertera jest proporcjonalna do impedancji obciążenia wyjścia:

$$Z_{we} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{A}{D} \frac{U_2}{I_2} = \frac{A}{D} Z_o \quad (5)$$

gdzie Z_o - impedancja obciążenia konwertera.

Inwertery impedancji są to czwórniki aktywne służące do odwrotnie proporcjonalnego przetworzenia impedancji obciążenia. Macierz łańcuchowa inwertera musi mieć parametry $A=0$ oraz $D=0$.

Dzięki temu impedancja wejściowa inwertera jest odwrotnie proporcjonalna do impedancji obciążenia:

$$Z_{we} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{B}{C} \frac{I_2}{U_2} = \frac{B}{C} \frac{1}{Z_o} \quad (6)$$

gdzie Z_o - impedancja obciążenia konwertera.

Literatura [2, 3] opisuje prostą w praktyce realizację wzmacniaczowego konwertera ujemnoimpedancyjnego, tj. układu zwanego CNIC (*Current Negative Inverting Converter*) o ujemnym współczynniku wzmocnienia prądowego:

$$I_1 = -\frac{1}{k_2} I_2 \quad (7)$$

gdzie $D = -\frac{1}{k_2}$ - ujemny współczynnik wzmocnienia prądowego

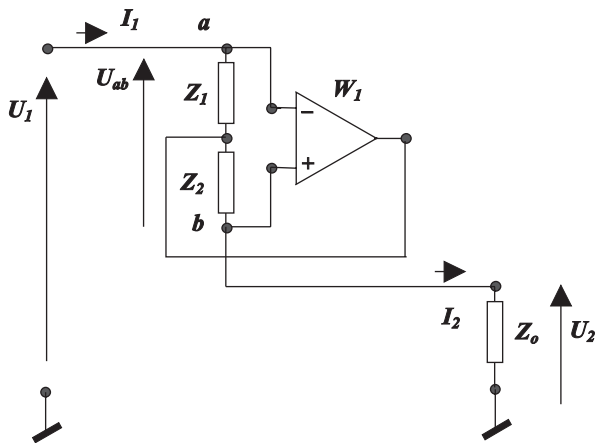
oraz o dodatnim współczynniku wzmocnienia napięciowego równym jedności:

$$U_1 = k_1 U_2 \quad (8)$$

gdzie $A = k_1 = 1$ jest dodatnim współczynnikiem wzmocnienia napięciowego. Jego impedancja to:

$$Z_{wc} = \frac{A}{D} Z_o = -k_2 Z_o \quad (9)$$

Schemat realizacji takiego konwertera z wykorzystaniem wzmacniacza podano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat jednowzmacniaczowego konwertera ujemnoimpedancyjnego

Należy tu zwrócić uwagę, że literatura [2, 3] na schemacie konwertera ujemnoimpedancyjnego zamiast impedancji Z_1, Z_2, Z_o podaje rezystancje R_1, R_2, R_o . Realizacja układu wzmacniacza tylko z rezystancjami wykazuje brak stabilnej jego pracy i występowanie drgań.

Aby uzyskać stabilną pracę układu, autor zastosował tak zwaną kompensację zewnętrzną w postaci kondensatora łączącego wyjście wzmacniacza z odwracającym wejściem „-” [4]. Kondensator ten zapewnia typowe ujemne różniczkujące sprzężenie zwrotne. Po zastosowaniu takiego sprzężenia uzyskuje się już stabilną pracę, a impedancja Z_1 staje się równoległym połączeniem rezystora R_1 i kondensatora korekcyjnego C_1 .

Na przykład przy zastosowaniu wzmacniacza scalonego typu OP07CP w układzie z samymi rezystancjami, praca układu jest niestabilna i występują drgania o częstotliwości ok. 70 kHz. Dodanie jednego równoległego kondensatora C_1 stabilizuje pracę układu, wartość pojemności powinna zapewnić stałą czasową $R_1 C_1$ o war-

tości ok. 50 μ s dla wymienionego wyżej wzmacniacza. Opisana korekcja ogranicza pasmo robocze konwertera do kilkudziesięciu Hz, jednak jest ono zazwyczaj wystarczające dla zastosowań symulatorów rezystancji.

Wzmacniacz W_1 ma właściwości zbliżone do wzmacniacza idealnego, toteż napięcie pomiędzy jego końcówkami wejściowymi oznaczonymi „+” oraz „-”, jest równe zero, a prądy obydwu końcówek wejściowych wzmacniacza są pomijalnie małe. Przy takim założeniu otrzymuje się następujące równanie napięć dla obwodu wejściowego wzmacniacza:

$$Z_1 I_1 + Z_2 I_2 = U_{ab} = 0 \quad (10)$$

Z równania tego wynika wartość współczynnika wzmocnienia prądowego:

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{Z_1}{Z_2} = -k_2 \quad (11)$$

Ponieważ napięcie pomiędzy końcówkami wejścia wzmacniacza jest równe zero, to występuje równość napięcia wejściowego i wyjściowego:

$$U_1 = U_2 \quad (12)$$

a wartość wzmocnienia napięciowego jest równa jedności

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{k_1} = 1 \quad (13)$$

Impedancja wejściowa konwertera wynosi:

$$Z_{wc} = -\frac{Z_1}{Z_2} Z_o \quad (14)$$

Przyjmując następujące wartości impedancji w układzie konwertera ujemnoimpedancyjnego:

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + sC_1 R_1}, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_o = R_o \quad (15)$$

otrzymamy następującą operatorową postać wejściowej impedancji konwertera:

$$Z_{wc}(s) = -\frac{R_1 R_o}{R_2} \frac{1}{1 + sC_1 R_1} \quad (16)$$

Układ ma charakterystykę członu inercyjnego pierwszego rzędu o stałej czasowej $R_1 C_1$.

Przy analizie przebiegów harmonicznym impedancja wejściowa konwertera jest opisana wzorem:

$$Z_{wc}(j\omega) = -\frac{R_1 R_o}{R_2} \frac{1}{1 + j\omega C_1 R_1} \quad (17)$$

Przy analizie układu dla bardzo niskich częstotliwości lub przy prądzie stałym impedancja wejściowa konwertera jest rezystancją opisaną wzorem:

$$R_{wc} = -\frac{R_1 R_o}{R_2} \quad (18)$$

Połączenie kaskadowe dwu konwerterów ujemnoimpedancyjnych CNIC, w których wszystkie impedancje są rezystancjami, oraz dołączenie cyfrowo sterowanej rezystancji $R_o(X_{we})$ jako obciążenia wyjścia drugiego konwertera, pozwalają na zrealizowanie symulatora dodatniej rezystancji w zakresie prądu stałego i niskich roboczych częstotliwości. Koniecznością jest zastosowanie w każdym konwerterze dodatkowego kondensatora dla zapewnienia stabilnej pracy układów.

Rys. 5 przedstawia sprawdzony doświadczalnie przez autora schemat symulatora rezystancji złożonego z kaskadowego połączenia dwu ujemnoimpedancyjnych konwerterów.

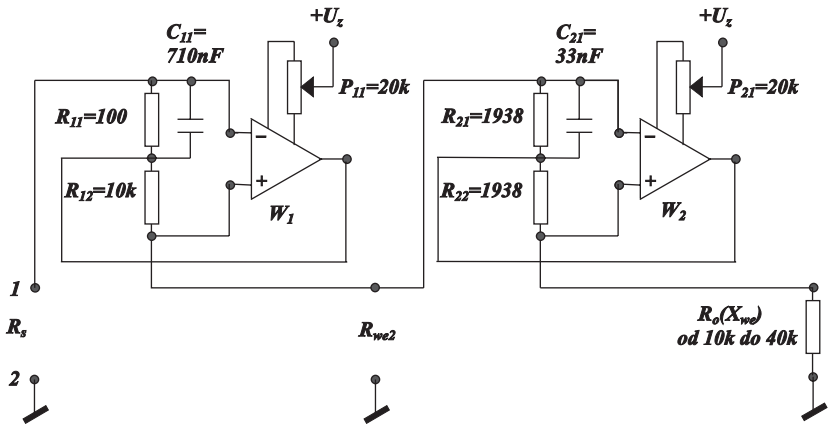
W układzie symulatora rezystancji zastosowano dwa wzmacniacze monolityczne typu OP07C firmy Linear Technology (odpowiednik AD OP07C Analog Devices). Ich napięcia nierównoważenia wyzerowano za pomocą potencjometrów P_{11} i P_{21} o wartościach rezystancji 20 kΩ zgodnie z kartą aplikacyjną wzmacniacza OP07. Długoterminowy dryft napięcia nierównoważenia tego wzmacniacza nie przekracza 2,5 μV w czasie ciągłej pracy przez 30 dni (720 godz.), a prąd polaryzacji wejść wzmacniacza wynosi typowo tylko 2 nA.

Wzmacniacz W_1 realizuje pierwszy konwerter ujemnoimpedancyjny, a rezystory precyzyjne R_{11} oraz R_{12} typu RM 67Z [5] o dryftach temperaturowych nie przekraczających 5 ppm/°C i miesięcznym dryfcie długoczasowym nie przekraczającym 10 ppm/720h zapewniają inwersję znaku i bardzo dokładne 100-krotne tłumienie wartości ujemnej rezystancji wejściowej R_{we2} drugiego konwertera. Iloraz rezystancji R_{11}/R_{12} jest korygowany dodatkowym rezystorem w procesie wzorcowania całego symulatora w celu osiągnięcia dokładnej wartości tłumienia rezystancji zadawanej $R_o(X_{we})$.

Wzmacniacz W_2 realizuje drugi konwerter ujemnoimpedancyjny, a rezystory precyzyjne R_{21} i R_{22} typu RM 67Z zapewniają inwersję znaku i bardzo dokładne wzmocnienie, ze współczynnikiem wzmocnienia równym jedności, zadawanej rezystancji $R_o(X_{we})$ na obciążeniu wyjścia tego konwertera.

Rezystancję $R_o(X_{we})$ zadawano w zakresie od 10 kΩ do 40 kΩ z dokładnością nie gorszą niż 0,009 %.

Kondensatory C_{11} oraz C_{21} zapewniają stabilną pracę konwerterów. Na zaciskach oznaczonych „1” oraz „2” symulatora rezystancji mierzono symulowaną rezystancję w zakresie od 100 Ω do 400 Ω. Charakterystykę symulatora w zakresie bardzo niskich częstotliwości lub przy prądzie stałym można opisać wzorem:



Rys. 5. Schemat symulatora rezystancji złożonego z kaskadowego połączenia dwu konwerterów ujemnoimpedancyjnych

Tab. 2. Zmierzone wartości błędów bezwzględnych w kilku punktach charakterystyki symulatora

R_s (Ω)	100,000	200,000	300,000	350,000	370,000	387,500	399,609
ΔR_s (mΩ)	+29	+1	-23	-36	-39	-38	-19

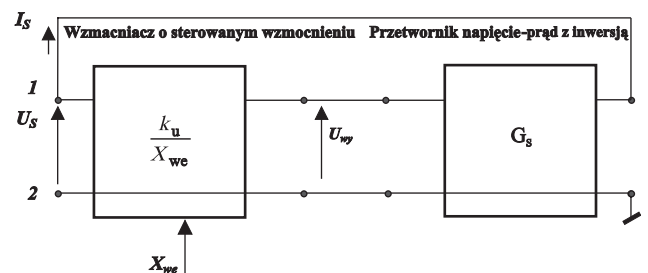
$$R_s = \frac{R_{11} R_{21}}{R_{12} R_{22}} R_{o\max} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n}) \quad (19)$$

gdzie $R_{o\max}$ - maksymalna wartość zadawanej rezystancji $R_o(X_{we})$.

Do zadawania rezystancji $R_o(X_{we})$ wykonano model i wykorzystano opisany wyżej i podany na rys. 2 dwójnikowy symulator rezystancji o parametrach: $n=10$, $R=20\text{k}\Omega$, $R_{pp}=0,4\ \Omega$, $R_{op}=2\ 10^8\ \Omega$.

Błąd względny mierzonej rezystancji w całym zakresie nie przekraczał 0,01 % w odniesieniu do górnej granicy zakresu 400 Ω. Tab. 2 podaje wyniki badań modelu symulatora o schemacie podanym na rys. 5 z układem zadawania rezystancji (symulatorem dwójnikowym) wg schematu podanego na rys. 2.

Symulatory rezystancji, zgodnie z wyprowadzonym wzorem (6), można realizować z wykorzystaniem inwerterów impedancji. Literatura [3] podaje schemat i opisuje teoretyczne zależności dla układu dwuwzmacniaczowego inwertera impedancji nazwanego żyratorem. Jest to układ wymagający większej liczby dokładnych rezystorów niż układ dwuwzmacniaczowy konwerterów ujemnoimpedancyjnych omówiony powyżej.



Rys. 6. Uproszczony schemat symulatora rezystancji z sygnałem prądowym wymuszonym na zaciskach tego symulatora

Autorowi nie jest znana żadna udana realizacja układu dokładnego symulatora rezystancji wykorzystującego wielorezystancyjny i wielowzmacniaczowy układ zyratora.

Symulatory rezystancji z układami wzmacniaczowymi o cyfrowo sterowanym sygnałem prądowym wymuszonym na zaciskach

Uproszczony schemat blokowy symulatora rezystancji z sygnałem prądowym wymuszonym na zaciskach symulatora podaje rys. 6. Symulator o tej zasadzie działania opracowano w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów [1] w Warszawie i oznaczono jako ZR-21. Jest to układ aktywny, który wymusza wartość prądu odbieranego z zacisków wejściowych „1” i „2” symulatora. Prąd ten ma wartość proporcjonalną do napięcia na zaciskach wejściowych U_s oraz odwrotnie proporcjonalną do cyfrowego sygnału sterującego X_{we} .

Najłatwiej przedstawić fizyczną realizację takiego symulatora rezystancji jako układ stanowiący kaskadowe połączenie:

- wzmacniacza napięciowego o pomijalnie dużej rezystancji wejściowej i o sterowanym współczynniku wzmocnienia napięciowego o wartości odwrotnie proporcjonalnej do sygnału sterującego X_{we} według zależności

$$U_{wy} = \frac{k_u}{X_{we}} U_s \quad (20)$$

gdzie

$$X_{we} = [a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_n 2^{-n}]$$

oraz

- przetwornika sygnału napięciowego U_{wy} na sygnał prądowy I_s z inwersją, co oznacza, że dla dodatniego napięcia na wejściu przetwornika, sygnał prądowy jest odbierany (*sink current*) przez zacisk wyjściowy tego przetwornika. Transmitancja przetwornika ma wymiar konduktancji G_s , a jego sygnał wyjściowy opisuje równanie

$$I_s = G_s U_{wy} \quad (21)$$

Z równań (20) oraz (21) otrzymamy wzór na impedancję wejścia symulatora:

$$Z_s = \frac{U_s}{I_s} = \frac{k_u}{G_s} X_{we} \quad (22)$$

Jeżeli w zakresie rozpatrywanego częstotliwościowego pasma roboczego symulatora, parametry k_u , G_s , X_{we} można traktować jako wielkości rzeczywiste, to symulowana rezystancja wynosi:

$$R_s = \frac{U_s}{I_s} = \frac{k_u}{G_s} X_{we} \quad (23)$$

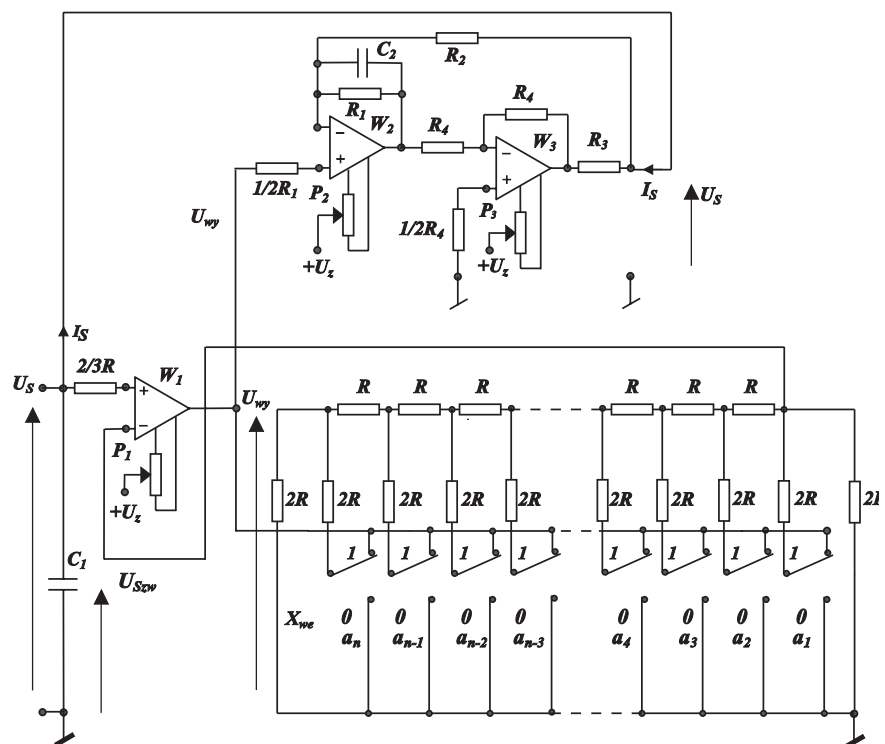
Uproszczony schemat opracowanego przez autora [1] układu symulatora rezystancji o oznaczeniu ZR-21 podano na rys. 7. Zawiera on układ inwersyjnego przetwornika napięcie-prąd, znany z literatury [6]. Układ tego przetwornika zrealizowano na dwu wzmacniaczach monolitycznych typu OP-07C oznaczonych na schemacie 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 i przy założeniu podanego na schemacie zwrotu prądu, wynikającego z inwersji układu, jego wartość jest opisana równaniem:

$$I_s = \frac{2U_{wy}}{R_3} \quad (24)$$

a więc transmitancja układu przetwornika ma charakter konduktancji o wartości:

$$G_s = \frac{2}{R_3} \quad (25)$$

Rezystancja wejściowa układu przetwornika napięcie-prąd jest bardzo duża, więc układ tego przetwornika nie obciąża wyjścia wzmacniacza o sterowanym wzmocnieniu W_1 . Wzmacniacz W_1 jest wzmacniaczem nieinwersyjnym o bardzo dużej rezystancji wejściowej o współczynniku wzmocnienia napięciowego odwrotnie proporcjonalnym do cyfrowego sygnału sterującego X_{we} . Wzmacniacz W_1 pracuje w układzie nieinwersyjnym, w którym jego napięcie sprzężenia zwrotnego jest pobierane z dzielnika napięcia wyjściowego, a dzielnikiem tym jest symetryczna drabinka



Rys. 7. Schemat układu symulatora rezystancji z cyfrowo sterowanym sygnałem prądowym wymuszonym na zaciskach symulatora

Tab. 3. Zmierzone wartości błędów bezwzględnych w kilku punktach charakterystyki symulatora w zakresie 400 Ω

R_s (Ω)	75,993	115,996	155,994	196,004	235,989	276,000	315,994	356,006	396,005
ΔR_s (mΩ)	-4	-5	-13	-21	-15	-24	-27	-37	-45

Tab. 4. Zmierzone wartości błędów bezwzględnych w kilku punktach charakterystyki symulatora w zakresie 4000 Ω

R_s (Ω)	399,95	800,09	1199,98	1600,13	2000,08	2399,29	2799,08	3199,14	3999,49
ΔR_s (mΩ)	-0,05	-0,16	-0,15	-0,28	-0,32	+0,49	+0,60	+0,57	+0,14

R-2R sterowana sygnałem cyfrowym. Drabinka ta połączona jest poprzez rezystory 2R przełącznikami sterowanymi cyfrowo do napięcia wyjściowego wzmacniacza U_{wy} , przy czym napięcie wyjściowe z drabinki pobierane jest z węzła 1 i jest to napięcie U_{szw} – napięcie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Ponieważ napięcie niezrównoważenia wzmacniacza W_1 (w opisywanym układzie zastosowano wzmacniacz monolityczny typu OP-07C o wzmocnieniu napięciowym nie mniejszym niż 10^6 V/V) jest sprowadzone do zera, to napięcie wejściowe wzmacniacza U_s jest praktycznie równe napięciu sprzężenia zwrotnego

$$U_s = U_{szw} \quad (26)$$

Rozpatrując schemat drabinki R-2R otrzymać można dla schematu z rys. 7 wzór na napięcie wejściowe wzmacniacza:

$$U_s = \frac{2U_{wy}}{3} [a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_n 2^{-n}] \quad (27)$$

Napięcie wyjściowe wzmacniacza będzie więc opisane wzorem:

$$U_{wy} = \frac{3U_s}{2} \frac{1}{[a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_n 2^{-n}]} \quad (28)$$

Napięcie wyjściowe wzmacniacza jest, więc odwrotnie proporcjonalne do sygnału sterującego X_{we} .

Przekształcając odpowiednio równania (28) oraz (24) i uwzględniając, że sygnał sterowania cyfrowego jest 15-bitowy, otrzymamy następujący opis charakterystyki symulatora rezystancji:

$$R_s = \frac{U_s}{I_s} = \frac{R_3}{3} [a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_{15} 2^{-15}] \quad (29)$$

Opisany układ realizuje dwa zakresy rezystancji: dla wartości $R_3 = 1200$ Ω zakres do 400 Ω oraz dla wartości $R_3 = 12000$ Ω zakres do 4000 Ω.

W układzie w dzielniku R-2R zastosowano rezystory precyzyjne typu RM 70Y o rezystancji $R = 20$ 250 Ω, oraz $2R = 40$ 500 Ω selekcjonowane o tolerancji 0,01 % dla czterech najbardziej znaczących bitów, o tolerancji 0,02 % dla następujących czterech bitów oraz o tolerancji 1 % dla ostatnich siedmiu bitów.

Jako przełączniki analogowe zastosowano mikroprzełączniki do obwodów drukowanych typu MT2

firmy ALCATEL o rezystancji styku nie przekraczającej 50 mΩ. Jako rezystory R_1, R_2, R_3, R_4 zastosowano rezystory precyzyjne RM 70Y lub AT 0,125 W o współczynniku temperaturowym rezystancji nieprzekraczającym 5 ppm/°C odpowiednio selekcjonowane lub odpowiednio korygowane rezystorami równoległymi dla zapewnienia dokładności 0,01 %. Pozostałe rezystory (takie jak $2/3R, 1/2R_1, 1/2R_4$) nie decydujące bezpośrednio o dokładności, są rezystorami typu MŁT 0,125 W o tolerancji 5 %.

Wszystkie trzy monolityczne wzmacniacze scalone OP-07C mają zastosowane potencjometry $P_1 = P_2 = P_3$ o rezystancji 20 kΩ, które umożliwiają wyzerowanie napięć niezrównoważenia na wejściach wzmacniaczy. Dla zapewnienia stabilnej pracy układu kaskadowego połączenia trzech wzmacniaczy objętych prądowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym, zastosowano kondensator C_2 o minimalnej stratności, o pojemności 369 nF, typu KSF/63 V oraz taki sam kondensator C_1 , w celu zminimalizowania poziomu szumów na zaciskach symulatora.

W opisanym układzie 15-bitowego symulatora ZR-21 uzyskano dokładności względne do 0,016 % wartości nastawianej, odniesione do rezystancji zakresu. Układ umożliwia symulowanie temperatury czujników rezystancyjnych Pt 100, Pt 500 oraz Pt 1000.

Tab. 3 podaje wyniki badań dokładności modelu użytkowego symulatora ZR-21 w zakresie 400 Ω, w przedziale od 75 Ω do 396 Ω.

Tab. 4. podaje wyniki badań eksperymentalnych dokładności modelu użytkowego symulatora ZR-21 w przedziale od 400 Ω do 4000 Ω.

Podsumowanie

Istnieje duża różnorodność rozwiązań układów elektronicznych symulatorów. Opisano tu możliwe rozwiązania, podzielone przez autora na trzy charakterystyczne grupy różniące się zasadą działania. Rozważania teoretyczne poparto szczegółowym opisem trzech zrealizowanych rozwiązań, po jednym z każdej grupy symulatorów.

Badania eksperymentalne potwierdziły możliwość symulacji czujników rezystancyjnych z dokładnością do 0,1 % zakresu mierników temperatury współpracujących z takimi czujnikami.

Dalszy rozwój nowych konstrukcji symulatorów o znacznie podwyższonej dokładności, wymaganych dla stanowisk legalizacyjnych ciepłomierzy mikroprocesorowych, będzie możliwy dzięki postępowi w technologii wytwarzania nowoczesnych rezystorów precyzyjnych, wykonywanych specjalną technologią foliową oraz dzięki zastosowaniu jako przełączników analogowych nowych tranzystorów unipolarnych nazwanych „Power MOSFET”.

Oferowane przez firmę Vishay (USA) rezystory typu H Series mają stabilność rocznej zmiany rezystancji rzędu 0,0005 % (5 ppm) oraz współczynnik temperaturowy nie większy niż 0,6 ppm/°C.

Firma International Rectifier dostarcza tranzystory unipolarne IRF3205 wykonane w technologii nazwanej „HEXFET Power MOSFET” o rezystancji kanału w stanie przewodzenia poniżej 10 mΩ, przy czym rezystancja ta ma wartość stabilną w czasie. Stanowi to przeciwieństwo właściwości rezystancji styku przekaźników lub przełączników podlegających zużyciu wskutek ścierania się specjalnych przewodzących warstw na stykach.

Można więc oczekiwać w nowych konstrukcjach symulatorów większych dokładności.

Bibliografia

1. Korytkowski J.: *Układy przetworników cyfrowo-analogowych napięcia, prądu i rezystancji oraz metoda ich analizy*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów. Warszawa 2004.
2. Bolkowski St.: *Teoria Obwodów Elektrycznych*. Wydanie 4. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1995.
3. Mikołajuk K.: *Podstawy analizy obwodów energo-elektronicznych*. PWN. Warszawa 1998.
4. Mitra S.K.: *Analiza i synteza układów aktywnych liniowych*. Wyd. Naukowo-Techniczne. Warszawa 1974.
5. HYBRYD Sp. z o. o. Pyskowice: Karta katalogowa. *Rezystory drutowe*.
6. Korytkowski J.: *Wzmacniacze monolityczne i metoda analizy elektronicznych układów z tymi wzmacniaczami*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów. Warszawa 2000. ■