

Sterowany cyfrowo symulator czujników termorezystancyjnych

Jerzy Bartoszewski
Daniel Dusza

Symulatory czujników termorezystancyjnych są układami sztucznie odtwarzającymi rezystancję rzeczywistą czujników, których wyjściowy sygnał rezystancyjny jest funkcją temperatury. Symulatory są stosowane do kontroli i kalibracji mierników temperatury i ciepła współpracujących w torze pomiarowym najczęściej z termorezystorami platynowymi. W niniejszej pracy autorzy prezentują sterowany cyfrowo symulator z analogowym 16-bitowym przetwornikiem rezystancji, odtwarzającym termometryczną charakterystykę czujnika Pt 100.

Elektryczne metody pomiaru temperatury wykorzystują różnego rodzaju czujniki aktywne i bierne, których sygnał wyjściowy – napięcie, prąd, rezystancja – jest funkcją mierzonej temperatury. Wśród nich dużą grupę stanowią czujniki wykonane z metali o właściwościach termometrycznych, najczęściej z platyny, w których wykorzystuje się zmianę rezystancji R_t rezystora metalowego pod wpływem zmiany temperatury t . Najpopularniejszym w tej grupie czujników jest platynowy termorezystor Pt 100 o nominalnej wartości rezystancji 100Ω dla temperatury 0°C . Wymagania dotyczące czujników platynowych, w tym charakterystyki przetwarzania $R_t = f(t)$ i dopuszczalnej jej niedokładności są znormalizowane w PN-EN 60751 [4]. Norma dopuszcza dla czujników klasy A tolerancję pomiaru temperatury t nie większą niż $(0,15 + 0,002 |t|)^\circ\text{C}$, dla klasy B: $(0,3 + 0,005 |t|)^\circ\text{C}$. Dla czujników klasy A dla $t=0^\circ\text{C}$ oznacza to błąd graniczny dopuszczalny rezystancji $0,060\%$ oraz dla $t=500^\circ\text{C}$ oznacza to błąd dopuszczalny rezystancji $0,14\%$. Dla czujników klasy B dla $t=0^\circ\text{C}$ oraz dla $t=500^\circ\text{C}$ oznacza to błąd graniczny dopuszczalny rezystancji odpowiednio $0,12\%$ i $0,38\%$. Opisany w pracy symulator, przeznaczony do kontroli i kalibracji mierników temperatury i ciepła, ma wielokrotnie mniejsze błędy graniczne niż czujniki Pt 100 klasy B stosowane w miernikach temperatury i ciepła.

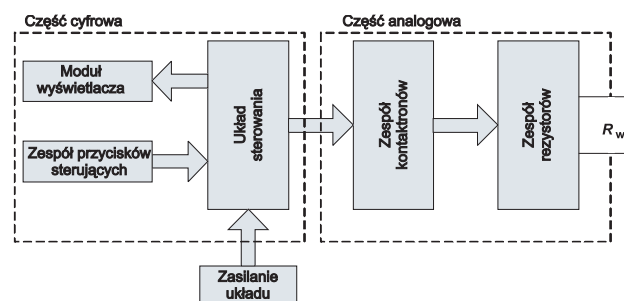
Blok analogowy opisanego symulatora zbudowany jest, w postaci 16-bitowego przetwornika rezystancji, z precyzyjnych rezystorów załączanych kombinacyjnie kluczami kontaktronowymi [1]. Rezystancyjny zakres pracy przetwornika 300Ω i jego rozdzielczość $4,5 \text{ m}\Omega$, umożliwiając odtworzenie 500 punktów charakterystyki termometrycznej czujnika Pt 100, zgodnie z wymaganiami normy [4].

Za sterowanie kluczami, równolegle załączającymi tory rezystancyjne przetwornika, odpowiada program wpisany w blok procesorowego sterowania symulatora. Symulowana nastawa temperatury po wybraniu

z klawiatury numerycznej jest zapisywana w buforach pamięci EPROM. Sygnały z wyjść danych pamięci, zamykając odpowiednie klucze torów rezystancyjnych powodują, że wypadkowa rezystancja torów jest funkcją zadanej temperatury.

Sterowany symulator czujnika Pt 100

Symulator jest zrealizowany w celu odtwarzania charakterystyki czujnika Pt 100 i charakteryzują go błędy mniejsze niż czujnika Pt 100 klasy A. Temperatura pracy wynosi od 0°C do 500°C , a rozdzielczość nastaw temperatury 1°C . Generowane rezystancje symulatora R_{wy} odpowiadają, z dokładnością $0,05\%$, wartościom rezystancji R_t rzeczywistych czujników, podanym w normie [4]. Układ symulatora składa się z dwóch zasadniczych części: wyjściowej analogowej i sterującej cyfrowej (rys. 1).



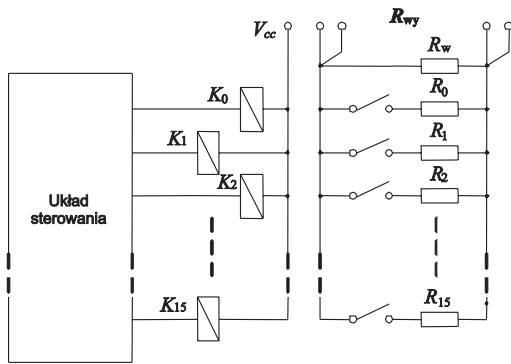
Rys. 1. Schemat blokowy sterowanego symulatora czujnika Pt 100

Blok analogowy zbudowany jest z grupy wysoko-stabilnych rezystorów precyzyjnych i przekaźników kontaktronowych. Blok cyfrowy tworzą: mikroprocesorowy układ sterowania, moduł wyświetlacza i zespół klawiszy sterujących pracą układu.

Moduł analogowy symulatora

Moduł analogowy symulatora o zakresie zmian rezystancji wyjściowej R_{wy} od 100Ω do 300Ω pokazany jest na rys. 2. Drabinka rezystorów składa się ze stałego rezystora R_w o wartości rezystancji 300Ω oraz 16 rezystorów

dr inż. Jerzy Bartoszewski, dr inż. Daniel Dusza,
Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn,
Napędów i Pomiarów Elektrycznych



Rys. 2. Moduł analogowy symulatora

(bocznikujących) $R_0 \dots R_{15}$ załączanych kombinacyjnie kluczami kontaktronowymi $K_0 \dots K_{15}$. Wartości bocznikujących rezystorów tworzą ciąg geometryczny o ilorazie 2, od wartości rezystora $R_0 = 250 \Omega$ do $R_{15} = 2^{15} R_0 = 8,2 \text{ M}\Omega$.

Drabinka jest zatem 16-bitowym przetwornikiem rezystancji o zakresie pracy 300Ω , którego rozdzielczość rezystancji na wyjściu równa $0,0015\%$ ($4,5 \text{ m}\Omega$) nie ma znaczącego wpływu na dokładność odtworzenia rzeczywistej rezystancji przetwornika. Odwrotność rezystancji wyjściowej R_{wy} określa zależność:

$$\frac{1}{R_{wy}} = \frac{1}{R_w} + a_0 \frac{1}{2^0 R_0} + a_1 \frac{1}{2^1 R_0} + \dots$$

$$\dots + a_{15} \frac{1}{2^{15} R_0} = \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_0} \sum_{i=0}^{15} a_i \cdot 2^{-i} \quad (1)$$

w której: $a_i \in \{0,1\}$, 0 - rezystor odłączony, 1 - rezystor załączony.

Zatem wypadkową rezystancję wyjściową symulatora opisuje wzór:

$$R_{wy} = \frac{R_w \cdot R_0}{R_0 + R_w \sum_{i=0}^{15} a_i \cdot 2^{-i}} \quad (2)$$

Zależność (2) stanowi podstawę do budowy tablicy kombinacji załączeń torów drabinki dla oczekiwanych wartości rezystancji wyjściowej symulatora oraz analizy niedokładności tej rezystancji będącej funkcją niedokładności rezystorów składowych $R_w, R_0 \dots R_{15}$.

Do budowy drabinki wykorzystano rezystory typu AT oraz drutowe manganinowe własnej konstrukcji autorów. Rezystory R_w, R_0 i R_1 , mające największy wpływ na dokładność odtworzenia rezystancji, zrealizowano w klasie dokładności $0,01\%$, rezystory R_2 i R_3 w klasie $0,02\%$, rezystory pozostałe w klasach odpowiednio gorszych. Duże wartości rezystancji rezystorów drabinki minimalizują szkodliwe wpływy m.in. rezystancji zestyków kon-

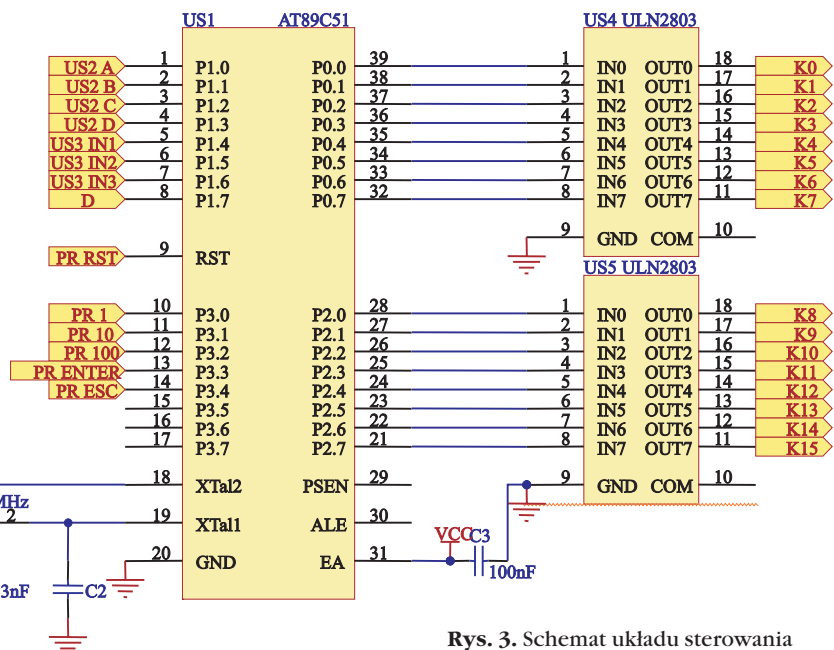
taktronowych (ok. $100 \text{ m}\Omega$); w układzie zastosowano kontaktrony firmy C.P.Clare typu PRMA 1A05 [1]. Ich wpływy dla torów z rezystorami $R_3 \dots R_{15}$ są już całkowicie pomijalne. Tory z rezystorami R_0, R_1 i R_2 wzorcowano z uwzględnieniem rezystancji tych zestyków. Duża wartość rezystancji zestyków kontaktronowych ($100 \text{ m}\Omega$) oraz niebezpieczeństwo znaczącej jej zmiany w wyniku długotrwałej pracy symulatora i ograniczonej trwałości zadziałań przekaźników kontaktronowych będą powodem i wprowadzenia obowiązkowej procedury okresowej kontroli dokładności symulacji rezystancji dla kilku najbardziej znaczących bitów symulatora. Rozwiązania użytkowe symulatora będą miały możliwość odpowiedniej korekty rezystancji torów kilku najbardziej znaczących bitów, dodatkowymi odpowiednimi potencjometrami strojeniovymi, aby wprowadzić korektę wzorcowania, eliminującą wykrytą zmianę rezystancji toru odpowiedniego bitu.

Moduł cyfrowy sterowania symulatora

Część cyfrową, realizującą w układzie symulatora funkcje sterująco-wykonawcze, tworzą: mikrokontroler, zespół przycisków sterujących, wyświetlacz symulowanej temperatury oraz wzmacniacz sygnałów sterujących kluczami wyjściowego analogowego przetwornika rezystancji.

Mikrokontroler symulatora

Do realizacji części sterującej wykorzystano mikrokontroler AT89C51 firmy ATMEL, należący do rodziny mikrokontrolerów 8051. Przez swoje porty komunikuje się on ze wszystkimi pozostałymi częściami struktury symulatora. Uproszczony schemat ideowy układu sterowania i wykorzystania portów mikrokontrolera pokazany jest na rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu sterowania

Zastosowany mikroprocesor, układ US1, jest typowym układem z serii mikrokontrolerów ośmiobitowych typu MCS-51 [3]. Cechą charakterystyczną układu AT89C51 jest kasowalna wewnętrznie pamięć typu FLASH o pojemności 4 kB, z możliwością wielokrotnego programowania. Dzięki wykorzystaniu wewnętrznej pamięci, możliwe jest wykorzystanie wszystkich portów mikrokontrolera do komunikacji z układami zewnętrznymi. Porty P0 i P2 służą do sterowania przekaźnikami kontaktowymi za pośrednictwem wzmacniaczy US4 i US5, dopasowujących sygnał do odpowiedniego poziomu. Port P1 służy do przesyłania wartości zadanej temperatury do modułu wyświetlacza, natomiast port P3 odpowiada za pięć przycisków sterujących układem wyboru wartości symulowanej temperatury.

Moduł wyświetlacza symulowanej temperatury

Układ podglądu aktualnie symulowanej temperatury pokazany jest na rys. 4.

Głównym elementem układu jest potrójny, siedmio-segmentowy wyświetlacz LED o sterowaniu multiplexowanym. Z portu P1 mikrokontrolera US1, sygnał jest

podawany w kodzie BCD na dekodery US2 kodu BCD na kod siedmiosegmentowy i poprzez rezystory ograniczające prąd, sygnał ten jest przesyłany do wyświetlacza. Kolejnymi trzema bitami portu P1, przez wzmacniacz US3, mikroprocesor steruje kolejnością wyświetlania cyfr. Częstotliwość wyświetlania oraz czas ekspozycji każdej z cyfr są ustawiane programowo.

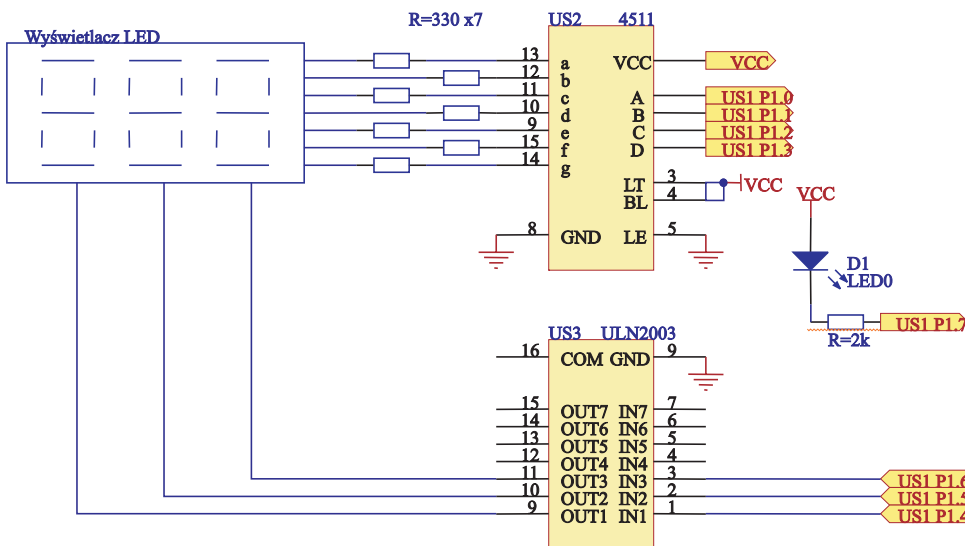
Zespół przycisków sterujących

Zespół przycisków sterujących umożliwia nastawy wartości symulowanej temperatury. Składa się z pięciu przycisków dołączonych do portu P3 mikrokontrolera oraz przycisku dodatkowego zerującego system. Schemat układu przedstawia rys. 5.

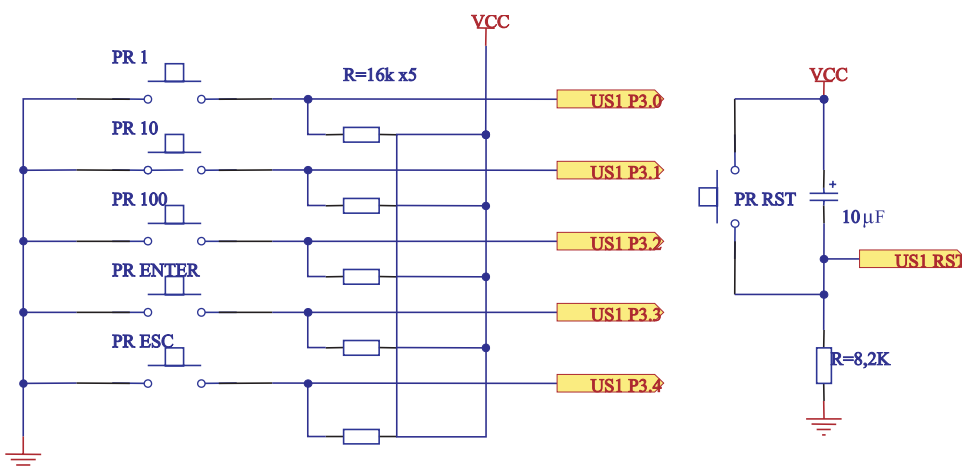
W stanie spoczynku na końcówkach portu P3 mikroprocesora występuje stan wysoki. Po zwarceniu przycisku do masy na końcówkach portu pojawia się stan niski – mikroprocesor dostaje informację o naciśnięciu przycisku.

Każdy z przycisków pełni określoną rolę w układzie. Przyciski 1, 10, 100 służą do ustawienia interesującej użytkownika wartości temperatury. Przycisk ENTER

powoduje zatwierdzenie wartości zadanej temperatury, co powoduje zmianę rezystancji wyjściowej symulatora na rezystancję odpowiadającą temperaturze wyświetlanej na wyświetlaczu. Przycisk ESC powoduje wyświetlenie aktualnie nastawionej wartości temperatury. Naciśnięcie przycisku RESET powoduje wyzerowanie systemu i powrót do warunków początkowych.



Rys. 4. Moduł wyświetlacza symulowanej temperatury

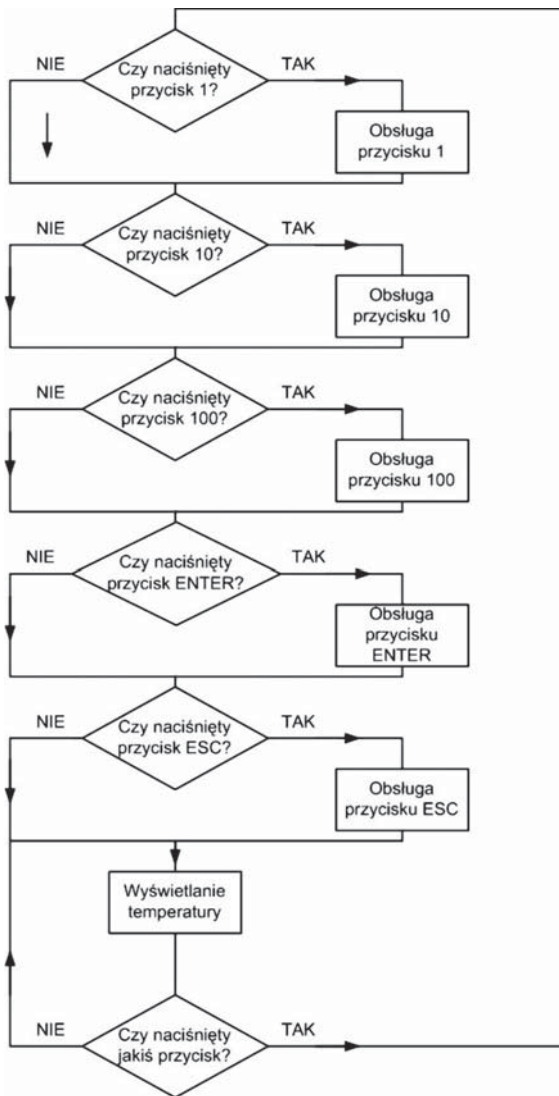


Rys. 5. Zespół przycisków sterujących

Realizacja programu mikrokontrolera

Językiem programowania procesora w symulatorze jest assembler z rodziny 8051 [2]. Możliwe jest również programowanie w języku C, bliższym dla większości użytkowników, jest to przydatne w przypadku bardziej zaawansowanych rozwiązań.

Działanie programu opiera się na ciągłym powtarzaniu jednej



Rys. 6. Algorytm działania programu

z dwóch pętli, zgodnie z algorytmem działania programu pokazanym na rys. 6.

W sytuacji, gdy nie został naciśnięty żaden przycisk sterujący, program wykonuje tylko operację odświeżania wskazania wyświetlanej temperatury. Jest to stan spoczynkowy układu. Po wciśnięciu dowolnego przycisku program przechodzi do wykonywania drugiej pętli.

Naciśnięcie danego przycisku jest rozpoznawane przez mikroprocesor na podstawie zmiany bitów portu P3, co objawia się pojawieniem się zera logicznego na jednym z wejść portu P3. Następuje programowe sprawdzenie, który przycisk został naciśnięty, po czym zostaje wykonana grupa instrukcji związana z tym przyciskiem. Grupy instrukcji przypisane przyciskom 1, 10, 100 są praktycznie takie same, różnią się jedynie wartościami stałych w nich zawartymi. Głównym ich zadaniem jest obsługa trzech 8-bitowych rejestrów R0, R1, R2 mikrokontrolera, w których zawarta jest informacja o wyświetlanej na wyświetlaczu temperaturze. Grupa instrukcji dotycząca przycisku ENTER dotyczy zatwier-

zenia zmian wprowadzonych za pomocą przycisków 1, 10, 100. Zadana temperatura zapisana w kodzie BCD zostaje przekształcona do postaci binarnej i zapisana w rejestrach R4 i R5 procesora. Kolejne instrukcje powodują pobranie z tablic danych informacji o kombinacji równolegle załączanych kontaktronów. Informacja ta trafia do portów P0 i P2, po czym zostają załączone odpowiednie rezystory drabinki części analogowej.

Wyniki badań eksperymentalnych

Zaprojektowany i zrealizowany symulator czujników termorezystancyjnych Pt 100 poddano badaniom kontrolnym dla wybranych nastaw symulowanej temperatury. Do pomiaru rezystancji wyjściowej symulatora zastosowano mostek procentowy typu MP-86 firmy INCO, o rozdzielczości względnej pomiaru rezystancji $\pm 0,001\%$, kalibrowany uwierzytelnionymi wzorcami rezystancji. Wyniki pomiarów zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wyniki pomiarów kontrolnych symulatora czujnika Pt 100

Lp.	t °C	R_{wy} Ω	R_{PN} Ω	δR_{wy} %
1	0	99,958	100,000	-0,042
2	1	100,353	100,391	-0,038
3	2	100,741	100,781	-0,040
4	5	101,926	101,953	-0,026
5	10	103,860	103,902	-0,040
6	15	105,811	105,849	-0,036
7	20	107,762	107,793	-0,029
8	25	109,698	109,734	-0,033
9	50	117,350	117,395	-0,038
10	99	138,059	138,121	-0,045
11	100	138,446	138,500	-0,039
12	110	142,218	142,286	-0,048
13	125	147,885	147,944	-0,040
14	150	157,233	157,315	-0,052
15	200	175,794	175,840	-0,026
16	250	193,985	194,074	-0,046
17	300	211,949	212,019	-0,033
18	400	246,951	247,038	-0,035
19	420	253,801	253,902	-0,040
20	450	264,004	264,112	-0,041
21	499	280,468	280,563	-0,034

W tabeli oznaczono:

t – cyfrowa nastawa temperatury symulatora

R_{wy} – rezystancja wyjściowa symulatora

R_{PN} – rezystancja czujnika Pt 100 według Polskiej Normy

$\delta R_{wy} = \frac{R_{wy} - R_{PN}}{R_{PN}}$ – względny błąd rezystancji wyjściowej.

Wnioski

Badania kontrolne symulatora potwierdzają prawidłowość działania części cyfrowej oraz poprawny dobór kombinacyjnie przełączanych rezystorów w bloku analogowym zarówno pod względem ich wartości jak i dokładności. Błąd odtworzenia w symulatorze rzeczywistej rezystancji czujnika Pt 100 określonej normą [4], nie przekracza wartości 0,05 %. Z przedstawionych w tab. 1 wyników pomiarów kontrolnych symulatora czujników Pt 100 wynika, że ma on w zakresie względnego błędu rezystancji wyjściowej systematyczne błędy ujemne zawarte w granicach od -0,026 % do -0,052 %. Można więc oczekiwać, że dzięki odpowiedniej procedurze wzorcowania symulatora, korygującej na plus wartość rezystancji, uzyska się znaczące zmniejszenie błędów symulatora w przedziale temperatury od 0 °C do 200 °C ze zmianą na dodatnie błędy symulatora w przedziale temperatury od 400 °C do 500 °C. Zaletą opisanego symulatora jest użycie do konstrukcji rezystancyjnego modułu analogowego niewielkiej liczby (17 szt.) rezystorów i kluczy przełączających.

Procesorowy system sterowania zastosowany w układzie umożliwia programową rozbudowę układu i wykorzystanie go do symulacji temperatury nie tylko czujnika Pt 100, ale również innych czujników termorezystancyjnych, np. Ni, Cu, dla których zmiany rezystancji nie przekraczają przedziału od 100 Ω do 300 Ω.

Możliwe jest również wykorzystanie symulatora do odtwarzania rezystancji dla całej rodziny czujników platynowych Pt 100, Pt 500 i Pt 1000, wymaga to jednak zaprojektowania innej struktury drabinkowego przetwornika rezystancji.

Bibliografia

1. CP CLARE CORPORATION, Katalog 220, Electromagnetic Relays, 1991.
2. Kruk S., *Programowanie w języku Assembler*, PNJ, Warszawa, 1992.
3. Rydzewski A., *Mikrokomputery jednoukładowe rodziny MCS-51*, WNT, Warszawa, 1995.
4. PN-EN 60751+A2:1997, *Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych*. ■