

4-kanalowy miernik temperatury wykorzystujący czujniki Pt100

Streszczenie. W artykule przedstawiono opatentowane rozwiązanie problemu wpływu nieliniowości czujnika temperatury Pt100 na dokładność pomiaru temperatury. Z normy PN-EN-60751+A wyznaczono wzór na zależność temperatury od rezystancji termorezystora. Istnieje zgodność zależności napięcia wyjściowego wzmacniacza z elementami wzoru. Zastosowane podejście zminimalizowało błąd wynikający z nieliniowości charakterystyki czujnika Pt100. W artykule opisano zbudowany i przetestowany 4-kanalowy miernik temperatury o zakresie pomiaru $T_C = 0 \div 850^\circ\text{C}$ z rozdzielczością $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Abstract. The article presents a patented solution concerning the problem of the non-linearity characteristics of the Pt100 temperature sensor and its influence on the temperature measurement accuracy. The formula expressing the dependence between temperature and resistance value of the thermoresistor is determined in the PN-EN-60751 + A standard. The applied approach minimized the error resulting from the non-linearity of the Pt100 sensor characteristics. Based on this idea a 4-channel temperature meter using Pt100 sensor was built. (**4-channel temperature meter using Pt100 sensors**).

Słowa kluczowe: mostek pomiarowy, stabilizacja wartości prądu, mikrokomputer Arduino, termorezystor Pt100, pomiar temperatury.

Keywords: measuring bridge, stabilization of the current value, Arduino microcomputer, Pt100 thermoresistor, temperature measurement.

Wstęp

Czujniki temperatury należą do najczęściej stosowanych, ponieważ wielkość fizyczna jaką jest temperatura jest mierzona, regulowana, rejestrowana i monitorowana w różnych środowiskach i w większości procesów technologicznych [1]. Niemal każde urządzenie stosowane w warunkach domowych, przemysłowych lub laboratoryjnych wykorzystuje czujniki temperatury. Do najczęściej spotykanych typów czujników temperatury należą: termistory, termopary, rezystancyjne czujniki temperatury (RTD), cyfrowe termometry w układach scalonych oraz analogowe termometry w układach scalonych [1-4]. Oddzielnym zagadnieniem jest problem kompensacji wpływu rezystancji przewodów łączących termorezystor z układem pomiarowym przy dwóch [5], trzech [6] i czterech przewodach [7].

W artykułach [8,9] przedstawiono układ korekty nieliniowości charakterystyki zmian wartości rezystancji R_{T_C} termorezystora Pt100 w zakresie zmian wartości temperatury $T_C = 0 \div 850^\circ\text{C}$. Natomiast w prezentowanym artykule opisano praktyczną realizację 4-kanalowego układu pomiarowego wykorzystującego opatentowane rozwiązanie [8-11].

Norma PN-EN-60751+A2 [12] określa wartość rezystancji R_{T_C} [Ω] termorezystora platynowego Pt100 w zależności od wartości temperatury T_C [°C] (1).

$$(1) \quad R_{T_C} = R_0 \cdot (1 + A \cdot T_C + B \cdot T_C^2)$$

gdzie: R_{T_C} – wartość rezystancji termorezystora w temperaturze $T_C = 0 \div 850^\circ\text{C}$, R_0 – wartość rezystancji termorezystora w temperaturze $T_C = 0^\circ\text{C}$, A, B – stałe określające własności platyny zgodne z normą PN-EN-60751+A2

Rozwiązując równanie (1), otrzymuje się zależność (2), która pozwala na wyznaczenie wartości temperatury termorezystora Pt100 w zależności od wartości rezystancji R_{T_C} .

$$(2) \quad T_C = \frac{-A}{2 \cdot B} - \sqrt{\left(\frac{A}{2 \cdot B}\right)^2 + \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{R_{T_C}}{R_0} - 1\right)}$$

Stale A oraz B nie zawierają informacji o wartości temperatury T_C . Istotnym elementem wzoru jest fragment przedstawiony wzorem (3).

$$(3) \quad \left(\frac{R_{T_C}}{R_0} - 1\right)$$

Wyznaczenie wartości temperatury wg wzoru (2) będzie dokładne, gdy wprowadzimy wartość napięcia U_{WY} , która wyni-

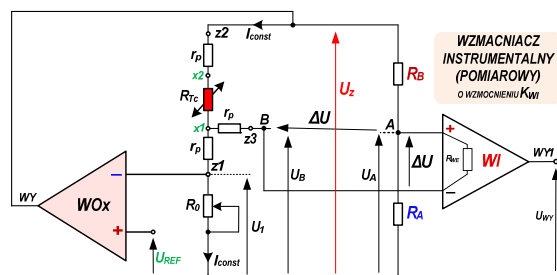
ka bezpośrednio z pomiaru napięcia wg wzoru (4).

$$(4) \quad \left(\frac{R_{T_C}}{R_0} - 1\right) = S_K \cdot U_{WY}$$

gdzie: S_K – stała kalibracyjna, U_{WY} [V] – napięcie pomiarowe otrzymywane z mostkowego wzmacniacza pomiarowego.

Mostek pomiarowy ze stabilizacją prądu I_{const} w gałęzi mostka z termorezystorem R_{T_C}

Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy układu mostka pomiarowego ze stabilizacją prądu I_{const} w gałęzi mostka z termorezystorem R_{T_C} . Stabilizację prądu I_{const} zapewnia wzmacniacz operacyjny WOX. Wzmacniacz WOX porównuje wartości zmian napięcia U_1 (na rezystancji R_0) z napięciem odniesienia U_{REF} . Każda zmiana wartości rezystancji R_{T_C} powoduje zmianę wartości napięcia U_1 . Zapewnienie równości $U_1 = U_{REF}$ jest możliwe przez zmianę U_2 pętli sprzężenia zwrotnego.



Rys.1. Schemat ideowy układu mostka pomiarowego ze stabilizacją prądu I_{const} w gałęzi mostka

Szczegółową analizę pracy układu mostka pomiarowego z rysunku 1 przedstawiono w pracach [8,9]. Zmianę wartości napięcia wyjściowego U_{WY} od wartości rezystora R_{T_C} opisano zależnością (5).

$$(5) \quad U_{WY} = \Delta U \cdot K_{WI} = K_{WI} \cdot \frac{U_{REF}}{2} \cdot \left(\frac{R_{T_C}}{R_0} - 1\right)$$

gdzie: K_{WI} – wartość wzmacnienia wzmacniacza WI

Przekształcając wzór (5), otrzymuje się wzory (6 ÷ 9).

$$(6) \quad \left(\frac{R_{T_C}}{R_0} - 1\right) = \frac{2}{K_{WI} \cdot U_{REF}} \cdot U_{WY}$$

$$(7) \quad S_K = \frac{2}{B \cdot K_{WI} \cdot U_{REF}}$$

$$(8) \quad \left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right) = S_K \cdot U_{WY}$$

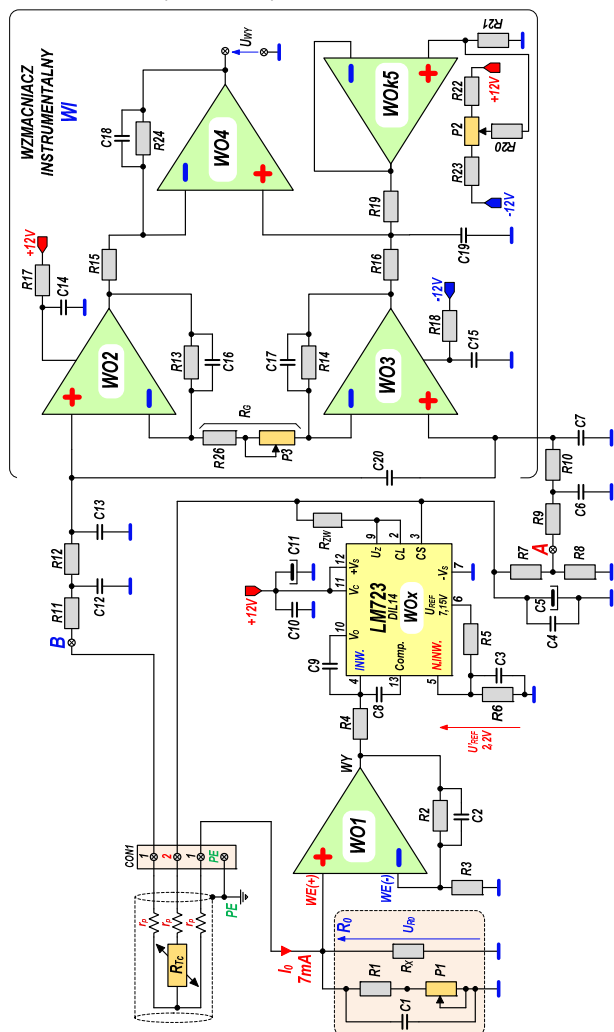
$$(9) \quad T_c = \frac{-A}{2 \cdot B} - \sqrt{\left(\frac{A}{2 \cdot B} \right)^2 + S_K \cdot U_{WY}}$$

gdzie: S_K – stała kalibracyjna zależna od zakresu maksymalnej wartości temperatury $T_{C_{MAX}} [^{\circ}C]$, ustalana dla napięcia $U_{WY} = 5V$.

Napięcie wyjściowe U_{WY} wg wzoru (5) mostkowego wzmacniacza pomiarowego spełnia warunek określony wzorem (4). Zatem, wartość tego napięcia można podstawić do wzoru (9).

Ważne jest także to, aby rezystancje R_A i R_B spełniały równanie: $\alpha = R_A / (R_A + R_B) = 0,5$ (rys.1), wówczas wartość rezystancji $R_A = R_B = R$. Rezystancje R_A i R_B mogą przyjmować wartości z zakresu $R = 100 \div 1000 \Omega$. Nie jest ważna bezwzględna wartość rezystancji R , lecz wzajemny stosunek R_A i R_B . Dla $\alpha = 0,5$ wpływ rezystancji r_p przewodów łączących termorezystor R_{Tc} z układem wzmacniacza pomiarowego (rys.1) jest wyeliminowany. Szczegóły kompensacji wpływu rezystancji r_p przewodów na dokładność odczytów czujnika wyjaśniono w [9].

Jeżeli pomiar wartości temperatury $T_c [^{\circ}C]$ ma rozpocząć się od wartości $T_c = 0^{\circ}C$, to wartość rezystancji rezystora $R_0 = 100 \Omega$ (dla Pt100).



Rys.2. Schemat ideowy mostkowego wzmacniacza pomiarowego (instrumentalnego)

Schemat ideowy mostkowego wzmacniacza pomiarowego (instrumentalnego)

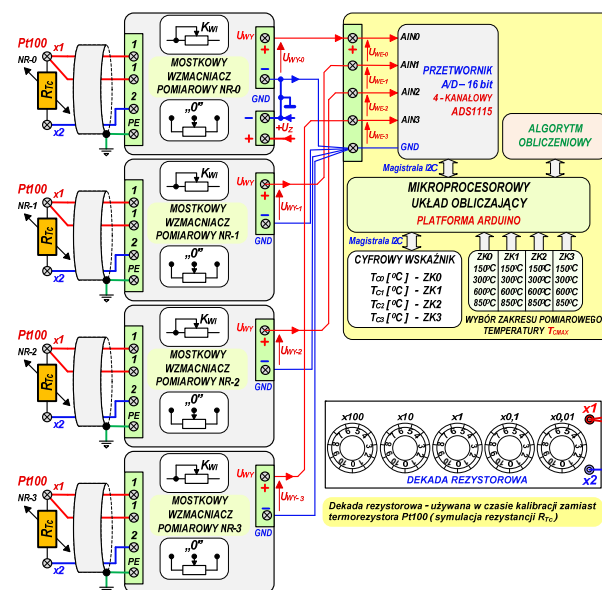
Schemat ideowy mostkowego wzmacniacza pomiarowego (instrumentalnego) przedstawiono na rysunku 2. Układ tego wzmacniacza zrealizowano praktycznie stosując

układ scalony LM723 oraz wzmacniacz instrumentalny WI. Szczegółowy opis tego układu przedstawiono w artykule [9].

Realizacja układu korekty nieliniowości czujnika Pt100

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy korektora nieliniowości termorezystora Pt100 w wersji 4-kanalowej. Liczba kanałów systemu pomiarowego wynika z typu zastosowanego przetwornika A/C. Przetwornik ADS1115 to układ 4-kanałowy. W skład korektora (rys.3) wchodziły moduły funkcjonalne:

1. Mostkowy wzmacniacz pomiarowy 4szt.,
2. 4-kanałowy (wejściowy) przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C) 16-bitowy typu ADS1115,
3. Mikroprocesorowy układ obliczeniowy wykorzystujący platformę Arduino,
4. Układ wyboru maksymalnej wartości pomiaru temperatury,
5. Wyświetlacz LCD współpracujący z modułem Arduino,
6. Układ współpracy modułu Arduino z zewnętrznym komputerem PC,
7. Czujniki Pt100 – 4 szt.



Rys.3. Blokowy schemat struktury pomiarowej z układem korektora nieliniowości termorezystora Pt100 w wersji 4-kanalowej.

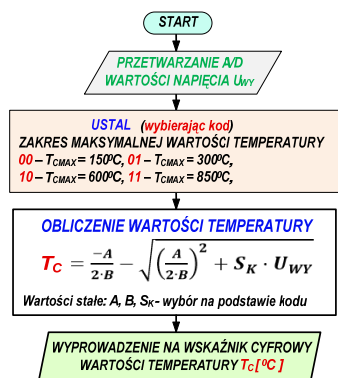
Zasada działania układu korektora nieliniowości termorezystora Pt100

Układ korektora nieliniowości termorezystora Pt100 działa następująco:

1. Mostkowy wzmacniacz pomiarowy, to przetwornik wartości rezystancji R_{Tc} czujnika Pt100 na napięcie. Napięcie wyjściowe U_{WY} przetwornika ma postać dogodną do dalszego obliczenia wartości temperatury wg wzoru (9),
2. Otrzymana analogowa postać napięcia wyjściowego wg wzoru (9) jest przetwarzana na postać cyfrową przy użyciu 4-wejściowego przetwornika A/C,
3. Wartość napięcia (z uwzględnieniem stałej kalibracji S_K maksymalnego zakresu pomiarowego temperatury $T_{C_{MAX}} [^{\circ}C]$) służy do obliczenia wartości temperatury $T_c [^{\circ}C]$. Obliczenia wykonano wg wzoru (9),
4. Obliczona wartość temperatury $T_c [^{\circ}C]$ prezentowana jest na wyświetlaczu LCD,
5. Wartość temperatury $T_c [^{\circ}C]$ przesyłana jest do komputera PC. W komputerze PC można wykonywać dalsze przetworzenie uzyskanych wyników.

Na potrzeby realizacji 4-kanałowego miernika temperatury zastosowano układ mikroprocesorowy Arduino. Użyta platforma cyfrowa służy do wykonania obliczeń z wykorzystaniem języka programowania C.

Przetworzoną od postaci napięcia U_{WY} temperaturę wykorzystuje algorytm obliczeniowy. Zastosowany 4-wejściowy 16-bitowy przetwornik A/C pozwala na osiągnięcie wymaganej ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) rozdzielności obliczeń temperatury T_c [$^{\circ}\text{C}$]. Algorytm obliczania temperatury T_c [$^{\circ}\text{C}$] przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Algorytm obliczeń układu korekty nieliniowości termorezystora Pt100 dla pojedynczego kanału

Kalibracja toru pomiarowego

Po montażu układów elektronicznych przeprowadzono kalibrację toru pomiarowego. Mostkowy wzmacniacz pomiarowy wytwarza napięcie wyjściowe U_{WY} , które jest proporcjonalne do zmian wartości rezystancji R_{Tc} zgodnie z zależnością przedstawioną wzorem (5).

We wzorze (9) można użyć wartości napięcia U_{WY} , które jest mierzone na wyjściu mostkowego wzmacniacza pomiarowego.

$$(10) \quad \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right) = \frac{1}{B} \cdot \frac{2}{K_{WI} \cdot U_{REF}} \cdot U_{WY} = S_K \cdot U_{WY}$$

$$(11) \quad S_K = \frac{\left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right)}{B \cdot U_{WY}} = \frac{\left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right)}{-0,0000005775 \cdot 5V}$$

$$(12) \quad S_K = \frac{-\left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right)}{0,0000028875} = -346320,34632 \cdot \left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right)$$

Istotnym usprawnieniem kalibracyjnym toru pomiarowego jest wprowadzenie stałej kalibracyjnej S_K . Nie jest wówczas wymagana dokładna wartość wzmocnienia K_{WI} oraz wartości napięcia U_{REF} .

Tabela 1. Obliczone (wg wzoru 12) wartości stałej kalibracyjnej S_K dla przyjętych wartości temperatury $T_{C_{MAX}}$

L.p.	$T_{C_{MAX}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	R_{Tc} [Ω]	U_{WY} [V]	S_K $R_0 = 100\Omega, U_{WY} = 5V$
1	100,0	138,51	5,0	- 133'367,965367
2	300,0	212,05	5,0	- 388'051,948051
3	400,0	247,72	5,0	- 509'402,753246
4	500,0	280,98	5,0	- 626'770,562769
5	600,0	313,71	5,0	- 740'121,212121
6	700,0	345,28	5,0	- 849'454,545453
7	800,0	375,70	5,0	- 954'805,194804
8	850,0	390,48	5,0	- 1'005'991,341991

Kalibracja polega na ustawieniu na wejściu wzmacniacza mostkowego wartości rezystancji $R_{T_{C_{MAX}}}$ oraz regulacji wartości wzmocnienia K_{WI} tak, żeby na wyjściu wzmacniacza pomiarowego otrzymać napięcie $U_{WY} = 5V$.

Korzystając ze wzorów od (10) do (12) wyznaczono wartość stałej kalibracyjnej S_K , dla przyjętej wartości temperatury $T_{C_{MAX}}$. Wyniki wybranych obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Sprawdzenie poprawności obliczeń wartości temperatury T_c [$^{\circ}\text{C}$] dokonano wstawiając do wzoru (13) obliczoną wartość stałej kalibracyjnej S_K oraz wartość napięcia U_{WY}

= 5V. Otrzymano wynik $T_c = 850^{\circ}\text{C}$.

$$(13) \quad T_c = 3383,80952380 - \sqrt{11450166,89335958 + S_K \cdot U_{WY}}$$

Obliczenie wartości napięcia U_{WY} w zależności od wyboru wartości temperatury $T_{C_{MAX}}$ [$^{\circ}\text{C}$]

Wzór (14) służy do wyznaczenia wartości napięcia wyjściowego w zakresie $U_{WY} = 0 \div 5V$. Dla $R_{Tc} = 390,48\Omega$, $R_0 = 100\Omega$, $T_{C_{MAX}} = 850^{\circ}\text{C}$ ($S_K = 1005991,341991$) otrzymano wartość $U_{WY} = 5V$.

$$(14) \quad U_{WY} = \frac{\left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right)}{B \cdot S_K} = \frac{1}{B \cdot S_K} \cdot \left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right) = 1,7212889 \cdot \left(\frac{R_{Tc}}{R_0} - 1 \right)$$

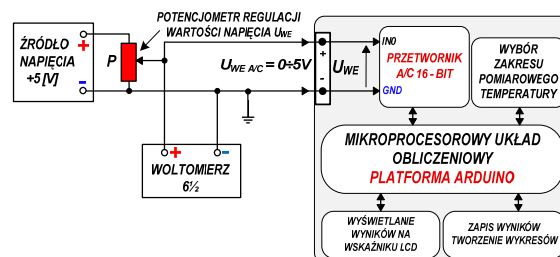
Opis wykonanego modelu korektora

Blokowy schemat struktury pomiarowej przedstawia rysunek 3. W czasie badań, wartość R_{Tc} termorezystora Pt100 jest symulowana dekadą rezystorową. Dekada rezystorowa umożliwia zadawanie wartości przystoju rezystancji $\Delta R_{Tc} = 0,01\Omega$ w zakresie zmian $R_{Tc} = 100 \div 400\Omega$.

W celu ograniczenia błędu pomiarowego, układ mostkowego wzmacniacza pomiarowego oraz mikroprocesorowego układu obliczeniowego poddano kalibracji.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy układu kalibracji, gdzie do wejścia przetwornika A/C doprowadzono napięcie wejściowe o wartości z zakresu $U_{WE} = 0 \div 5V$.

Do zacisków wzorcowego źródła napięciowego (+5V) podłączono potencjometr, który umożliwia zmianę wartości napięcia podawanego na przetwornik w zakresie $U_{WE/A/C} = 0 \div 5V$.



Rys.5. Schemat blokowy układu kalibracji mikroprocesorowego układu obliczeniowego

Program obliczeniowy dla mikrokomputera Arduino

Zastosowano oprogramowanie (Telemetry Viewer w środowisku Java Runtime Environment) dostępne dla mikrokontrolera Arduino. W programie została uwzględniona opcja wyboru zakresu mierzonej temperatury $T_{C_{MAX}}$ [$^{\circ}\text{C}$]. Zakres ustala się przełącznikami. Kody proponowanych zakresów pomiarowych $T_{C_{MAX}}$ [$^{\circ}\text{C}$] przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Kody dla wybranego zakresu temperatur

L.p.	$T_{C_{MAX}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	Przykłady zastosowania	Kod zakresu ZKO $\div 3$
1	0 \div 150	Pomiar temperatury wody, ciepłownictwo	00
2	0 \div 300	Pomiar temperatury wody w rozszerzonym zakresie zmian temperatury	01
3	0 \div 600	Turbiny parowe	10
4	0 \div 850	Procesy spalania	11

Sprawdzenie poprawność pomiaru temperatury T_c

Procedura sprawdzająca poprawność pomiaru temperatury T_c [$^{\circ}\text{C}$] została podzielona na trzy etapy:

Etap 1 – sprawdzenie poprawności działania programu obliczającego wartość temperatury T_c [$^{\circ}\text{C}$], w zależności od wartości napięcia wejściowego U_{WE} podawanego na wejście przetwornika A/C. Zmieniano wartości napięcia wejściowe w zakresie $U_{WE} = 0.00 \div 5.00V$. Zasadę sprawdzania przed-

stawia rysunek 5. Program oblicza wartość $T_C [^{\circ}C]$ wg algorytmu przedstawionego na rysunku 4.

Etap 2 – kalibracja dekady rezystorowej o przyroście $\Delta R = 0,01 \Omega$. Przed użyciem dekady przeprowadzono jej kalibrację z użyciem dokładnego (6 1/2 cyfry) miernika rezystancji typ FLUKE 8846A. Pomiar w układzie 4-przewodowym.

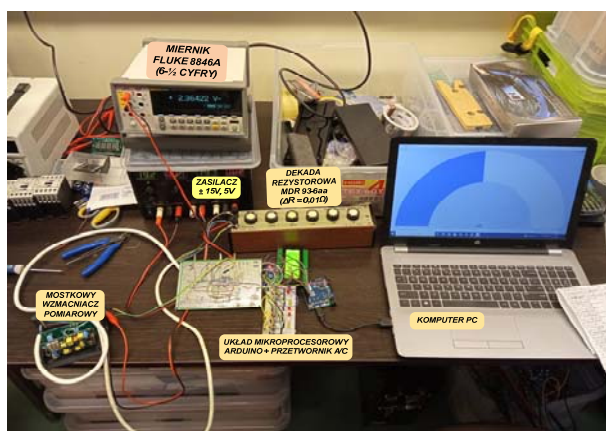
Etap 3 – kalibracja toru pomiarowego składającego się:

- z dekady rezystorowej (symulacja zmian wartości rezystancji $R_{Tc} [\Omega]$),
- mostkowego wzmacniacza pomiarowego,
- przetwornika analogowo- cyfrowego A/C – ADS1115,
- modułu mikrokontrolera Arduino.

Zakresy maksymalnej wartości temperatury $T_{C_{MAX}} [^{\circ}C]$ ustalono przy pomocy zwor przyjmujących stan 0 lub 1. Ustawienie zwor odczytuje układ Arduino.

Obliczoną przez mikrokomputer Arduino wartość temperatury $T_C [^{\circ}C]$ odczytywano ze wskaźnika cyfrowego LCD.

Na rysunku 6 przedstawiono kompletny zestaw podzespołów elektronicznych oraz aparatury pomiarowej wykorzystanej do przeprowadzenia kalibracji całego toru pomiarowego.



Rys.6. Kompletny zestaw podzespołów elektronicznych i aparatury pomiarowej do przeprowadzenia kalibracji całego toru pomiarowego

Na podstawie wykonanych testów, które szczegółowo opisano w [13], stwierdzono całkowitą zgodność pomiędzy wartościami nastaw dekady rezystorowej (symulującej wartość rezystancji $R_{Tc} [\Omega]$), a otrzymanym (przez obliczenie przez mikrokomputer Arduino) wynikiem temperatury $T_C [^{\circ}C]$. Wynik wartości temperatury $T_C [^{\circ}C]$ wskazywany jest na wyświetlaczu LCD z rozdzielczością do $0,1^{\circ}C$. Szczegółowe tabele pomiarowe, które dokumentują proces weryfikacji opracowanego układu, zawiera praca [13].

Konstrukcja miernika nie wymaga dodatkowych ustawaień wynikających z potrzeby minimalizacji błędów pomiarowych związanych z nieliniową charakterystyką czujnika Pt100.

Podsumowanie

Pomiary sprawdzające potwierdzają, że można wykonać układ korekty nieliniowości termorezystora Pt100 z wykorzystaniem mikrokontrolera Arduino, używając wzmacniacza mostkowego ze stabilizacją wartości prądu w gałęzi z termorezystorem Pt100.

Model miernika temperatury zapewnia dokładny pomiar temperatury w zakresie $T_C = 0 \div 850^{\circ}C$. Rozdzielczość pomiaru wynosi $\pm 0,1^{\circ}C$. W istotnym stopniu zminimalizowano wpływ nieliniowości $R_{Tc} [\Omega]$ termorezystora Pt100 na dokładność wskazań wartości temperatury. Zastosowano przetwornik A/C typu ADS1115, co umożliwiło zbudowanie miernika 4-kanalowego. Przedstawiony miernik temperatury można zastosować na przykład w dokładnych układach pomiaru ciepła.

Wnioski

Wykonany model 4-kanalowego miernika temperatury potwierdza założenia projektowe przedstawione w zgłoszeniach patentowym [10, 11] oraz w artykułach [8, 9]. Potwierdzona została też teza, że używając mikroprocesorowej platformy Arduino w połączeniu z zaproponowanym mostkowym układem pomiarowym możliwe jest zbudowanie wysokiej jakości (ale też taniego) 4-kanalowego miernika temperatury w oparciu o termorezystory platynowe Pt100.

Dalszy rozwój tego tematu powinien dotyczyć zbudowania wielokanalowego (do 64 kanałów pomiarowych) miernika temperatury z użyciem czujników Pt100. Podobną konstrukcję miernika można wykonać używając mikrokontrolera Raspberry Pi, STM32 lub wprost komputera PC.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.

Autorzy:

dr hab. inż. Jan Iwaszkiewicz, e-mail: j.iwaszkiewicz@we.umg.edu.pl,
dr inż. Adam Muc, e-mail: a.muc@we.umg.edu.pl, dr inż. Leszek Piechowski, e-mail: l.piechowski@we.umg.edu.pl, inż. Krystian Kasperek, e-mail: 44713@student.umg.edu.pl. Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-200 Gdynia

LITERATURA

- [1] Chang, H. Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress; Oxford University Press: Oxford, UK, 2004
- [2] Padilla, B. Temperature Sensing with Thermistors; Texas Instruments: Dallas, TX, USA, 2020
- [3] Jack, K.E.; Nwangwu, E.O.; Eto, I.A.; Osuagwu, E.U. A Simple Thermistor Design for Industrial Temperature Measurement. IOSR J. Electr. Electron. Eng. 2016, 11, 57–66
- [4] Zhao, Y.; Donaldson, W.R. Systematic Study on Aluminum Composition Nonuniformity in Aluminum Gallium Nitride Metal–Semiconductor–Metal Photodetectors, IEEE Trans. Electron Devices 2018, 65, 4441–4447
- [5] Li, W.; Xiong, S.; Zhou, X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs). Sensors 2020, 20, 2742
- [6] Tipparat, J. Interface Circuit for Three-Wire Resistance Temperature Detector with Lead Wire Resistance Compensation. In Proceedings of the 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C), Bangkok, Thailand, 11–13 December 2019; IEEE: New York, NY, USA, 2020
- [7] Erkan, K.; Akkoyunlu, B.; Balkan, E.; Tayanc, M. A portable borehole temperature logging system using the four-wire resistance method. J. Geophys. Eng. 2017, 14, 1413–1419
- [8] Piechowski L., Iwaszkiewicz J., Muc A.: Aktywny mostek pomiarowy ze stabilizacją prądu do wyznaczenia temperatury za pomocą czujnika temperatury Pt100, *Przegląd Elektrotechniczny Nr2/2022*
- [9] Piechowski L., Iwaszkiewicz J., Muc A.: The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence, *Energies* 2021, 14, 8214, 1-18
- [10] Piechowski L., Rządkowski R., Patent PL226444B1 Układ wyznaczania rzeczywistej temperatury termorezystora platynowego, *UPRP, 2014*
- [11] Piechowski L., Patent PL272139A1, opis patentowy, 1988
- [12] Norma PN-EN 60751+A2, PKN, Warszawa, 2009
- [13] Kasperek K., „Układ korekty nieliniowości termorezystora Pt100”, Praca dyplomowa inżynierska UMG WE KAO, 2022