

doi:10.15199/48.2022.02.27

Aktywny mostek pomiarowy ze stabilizacją prądu do wyznaczania temperatury za pomocą czujnika temperatury Pt100

Streszczenie. W artykule przedstawiono układ mostka aktywnego, który umożliwi rozwiązanie istotnego problemu, polegającego na zapewnieniu poprawnych wskazań wartości temperatury w szeroki zakresie pomiarowym dla czujnika temperatury Pt100 o własnościach zdefiniowanych normą (PN-EN-60751+A2). Przedstawiony układ mostka aktywnego jest połączeniem właściwości mostkowego wzmacniacza pomiarowego ze stabilizacją wartości prądu w gałęzi, w której umieszczono czujnik Pt100. W artykule skupiono się na porównaniu pomiaru temperatury w typowym mostku rezystancyjnym i pomiarze wykonanym w opracowanym mostku aktywnym, który stał się też przedmiotem patentu. Dla wykonanych prób, w których zweryfikowano poprawność działania układu do pomiaru temperatury i na podstawie otrzymanych wyników porównano jakość pomiarów temperatur w szerokim zakresie zmian.

Abstract. The article presents an active bridge system which enables the solution of a significant problem consisting in ensuring correct indications of temperature values in a wide measuring range for a Pt100 temperature sensor with properties defined by the standard (PN-EN-60751 + A2). The presented active bridge system combines the properties of the measuring amplifier with the stabilization of the current value in the branch in which the Pt100 sensor was placed. The article focuses on the comparison of the temperature measurement in a typical resistance bridge and the measurement made in the developed active bridge, which has also become the subject of a patent. For the tests performed, in which the correctness of the temperature measurement system operation was verified, and on the basis of the obtained results, the quality of temperature measurements was compared in a wide range of changes. (**Active measuring bridge with current stabilization for temperature determination using a Pt100 temperature sensor**).

Słowa kluczowe: mostek pomiarowy, termorezystor Pt100, kompensowanie napięcia, pomiar rezystancji, pomiar temperatury.

Keywords: measuring bridge, Pt100 resistance thermometer, voltage compensation, resistance measurement, temperature measurement.

Wstęp

Czujniki temperatury należą do najczęściej stosowanej grupy czujników, ponieważ wielkość fizyczna jaką jest temperatura, jest mierzona, regulowana, rejestrowana i monitorowana w różnych środowiskach i w większości procesów technologicznych. Do najpopularniejszych typów czujników temperatury należą: termistory, termoelementy, rezystancyjne czujniki temperatury RTD (ang. *Resistance Temperature Detectors*), scalone układy termometrów cyfrowych i scalone układy termometrów analogowych [1-11].

W artykule poświęcono uwagę rezystancyjnym detektorom temperatury RTD, które są czujnikami temperatury zawierającymi rezystor. Rezystor stosowany w RTD zmienia wartość rezystancji wraz ze zmianą temperatury. Najpopularniejszym przykładem detektora RTD są czujniki temperatury z serii Pt100, które są używane od wielu lat do pomiaru temperatury w procesach laboratoryjnych i przemysłowych. Pt100 to jeden z najdokładniejszych czujników temperatury. Zapewnia nie tylko dobrą dokładność, ale także doskonałą stabilność i powtarzalność. Pt100 są również stosunkowo odporne na zakłócenia elektryczne i dlatego dobrze sprawdzają się przy pomiarach temperatury w środowiskach przemysłowych, zwłaszcza w otoczeniu silników, generatorów i innych urządzeń wysokiego napięcia [12-14].

Większość detektorów temperatury RTD składa się z cienkiego i zwiniętego drutu, który jest owinięty wokół rdzenia ceramicznego lub szklanego. Istnieją też wykonania czujnika w postaci napyłonej platyny na podłożu ceramiczne. Czujnik jest zazwyczaj delikatny, dlatego często umieszcza się go w osłonie sondy. Czujnik RTD wykonywany jest z ściśle określonego materiału, który jest w przypadku najważniejszym elementem tego czujnika. Od wykonanego materiału zależą parametry użytkowe czujnika. Najczęściej detektory RTD wykonane są z platyny lub niklu. Charakterystyki temperaturowe tych materiałów są dokładnie udokumentowane, co pozwala na precyzyjne wyznaczenie na ich podstawie temperatury. Istnieją dwa standardy termorezystorów Pt100, jednym z nich jest norma

europejska, znana również jako norma DIN (de. *Deutsches Institut für Normung*) lub IEC (ang. *International Electrotechnical Commission*) oraz norma amerykańska ASTM (ang. *American Society for Testing and Materials*). Norma europejska jest uważana za światowy standard dla platynowych czujników RTD. Norma DIN/IEC 60751 (lub po prostu IEC751), wymaga, aby RTD miał rezystancję elektryczną 100,00 Ω przy 0°C i współczynnik temperaturowy rezystancji (TCR) 0,00385 O/O°C w zakresie temperatur od 0 do 100°C [12].

Istotnym problemem, który występuje w trakcie pomiaru temperatury z wykorzystaniem rezystancyjnego czujnika temperatury jest potrzeba ograniczenia wpływu rezystancji przewodów, którymi taki czujnik jest podłączony do układu pomiarowego. Zasadniczo, rozpatrywane są trzy sposoby podłączania takiego czujnika [8], tj. wykorzystujące dwa przewody [9], trzy przewody [10] i trzecie podejście, wykorzystujące cztery przewody [11]. Należy nadmienić, że opisywany układ pomiarowy wykorzystuje kompensację rezystancji przewodów doprowadzających metodą trzyprzewodową, ale nie jest ona przedmiotem artykułu [13].

W artykule przedstawiono metodę dokładnego wyznaczania rzeczywistej wartości temperatury termorezystora Pt100 w szerokim zakresie pomiarowym temperatury $T_C = 0-600^{\circ}\text{C}$, za pomocą opracowanego do tego celu aktywnego mostka pomiarowego. Treści zamieszczone w artykule zostały oparte na opisach patentowych [13] i [14], których autor jest współtwórcą.

Aktywny mostek pomiarowy ze stabilizacją prądu w gałęzi mostka

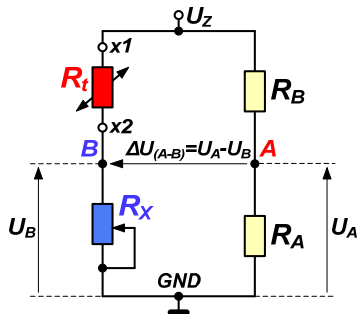
W większości zastosowań termorezystor Pt100 stosuje się w układzie pasywnego mostka pomiarowego (rys.1) [6-7, 12].

Układ z rys. 1 stanowi mostek pasywny do wyznaczenia wartości rezystancji R_t . Zawiera on termorezystor reprezentowany przez rezystancję R_t , oraz rezystory R_B i R_A , które są umieszczone w drugiej gałęzi mostka. Rezystor R_X połączono (w pierwszej gałęzi mostka) szeregowo z rezystorem R_t . Dla określonej wartości temperatury T_C

wyrażanej w [°C] można doprowadzić, poprzez zmianę wartości rezystancji R_X do równowagi napięć $U_A = U_B$. Zachodzi wówczas warunek wg wzoru (1).

$$(1) \quad \Delta U_{(A-B)} = U_A - U_B = 0$$

Zmiana wartości temperatury powoduje zmianę wartości rezystancji R_t , co wprowadza (rys.1) zmianę wartości napięcia U_B , która to wpływa na wartość $\Delta U_{(A-B)}$, będącą pewnego rodzaju uchybem. Zmiana wartości U_B spowoduje, że wartość $\Delta U_{(A-B)}$ będzie różna od zera. Ponowna regulacja wartości R_X spowoduje, że różnica napięć $\Delta U_{(A-B)}$ będzie dążyła do zera.



Rys.1. Schemat pasywnego mostka pomiarowego z termorezystorem Pt100 reprezentowanym przez rezystancję R_t .

Przeprowadzono poniżej analizę wartości napięć U_B i U_A dla mostka pasywnego przedstawionego na rys.1. Celem analizy jest uzyskanie zależności, z której będzie można w łatwy sposób wyliczyć temperaturę termorezystora Pt100. Spadek napięcia U_B jest wyrażony wzorem:

$$(2) \quad U_B = U_Z \cdot \left(\frac{R_X}{R_X + R_t} \right),$$

gdzie: U_Z – wartość napięcia zasilania mostka. Natomiast spadek napięcia U_A jest dany zależnością:

$$(3) \quad U_A = U_Z \cdot \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} \right) = \alpha \cdot U_Z.$$

Jeżeli $R_A = R_B$ to α zwarta we wzorze (3) jest równa: $\alpha = 1/2$.

Ponieważ różnica napięć $\Delta U_{(A-B)}$ jest liczona ze wzoru (1) to po podstawieniu zależności (2) i (3) do tego wzoru otrzymujemy:

$$(4) \quad \Delta U_{(A-B)} = \frac{U_Z}{2} \cdot \left(\frac{R_t - R_X}{R_X + R_t} \right).$$

Dla przypadku, gdy $U_A = U_B$, wartości rezystancji R_t odpowiada wartość rezystancji R_X . Na podstawie wartości rezystancji R_t i znajomości charakterystyk temperaturowych platyny można obliczyć wartość temperatury T_C na podstawie wzoru, który można następnie otrzymać rozwiązując równanie kwadratowe zawarte w normie europejskiej PN-EN-60751+A2 lub wykorzystać obliczone wartości temperatur, które w postaci stabilizowanej, zostały zamieszczone w tej normie [12-14].

W normie europejskiej (PN-EN-60751+A2) została analitycznie opisana zmiana wartości rezystancji termorezystora platynowego Pt100 (5) w zależności od zmian wartości temperatury w zakresie od 0 do 600°C.

$$(5) \quad R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot T_C + B \cdot T_C^2)$$

gdzie: R_t – wartość rezystancji termorezystora w temperaturze T_C [°C], R_0 – wartość rezystancji termorezystora w temperaturze $T_C = 0^\circ\text{C}$, wg normy (PN-EN-60751+A2), $R_0 = 100\Omega$ (lub 500Ω , a także 1000Ω), A , B – stałe związana z własnością materiału platyna P_t wg

normy (PN-EN-60751+A2), $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} [1 / 0C]$, $B = -5775 \cdot 10^{-7} [1 / 0C^2]$.

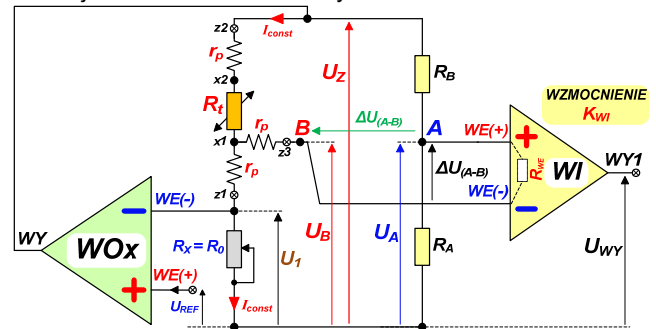
Rozwiązując równanie kwadratowe (5) otrzymano zależność wg wzoru (6), który określa wartość temperatury T_C termorezystora w zależności od wartości rezystancji R_t .

$$(6) \quad T_C = \frac{-A}{2 \cdot B} - \sqrt{\left(\frac{A}{2 \cdot B} \right)^2 + \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)}$$

Obliczanie wartości temperatury bezpośrednio wg wzoru (6) wprowadza duże ułatwienie, natomiast jeżeli do wzoru (6) wprowadzi się wartość napięcia U_P wynikającą z pomiaru tego napięcia w układzie mostka, to otrzyma się nową zależność równą iloczynowi współczynnika proporcjonalności (S_K) i napięcia pomiarowego (U_P) (7).

$$(7) \quad \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) = S_K \cdot U_P$$

Układ mostka pasywnego stał się punktem wyjścia do rozważań nad koncepcją aktywnego mostka rezystancyjnego, który wykorzystuje wzmacniacz operacyjny przedstawiony na rys.2 [9,10]. W układzie z rys. 2 możliwa jest stabilizacja wartości prądu $I = I_{const}$ w gałęzi mostka, w której umieszczono termorezystor R_t .



Rys.2. Schemat aktywnego mostka pomiarowego ze stabilizacją wartości prądu $I = I_{const}$ w gałęzi mostka z termorezystorem Pt100

Wzmacniacze operacyjne, mimo że są znane od wielu lat w elektronice to nadal są stosowane w licznych aplikacjach ze względu na swoje powszechnie znane właściwości [15-18]. Wzmacniacz oznaczony jako WOx na rys. 2 pełni rolę źródła prądowego, którego zadaniem jest stabilizacja prądu w gałęzi mostka z rezystorem R_t . Natomiast wzmacniacz instrumentalny oznaczony jako WI pełni rolę układu skalującego napięcie wyjściowe reprezentujące mierzoną temperaturę [13-14].

Na początku analizy zostały wyznaczone spadki napięć U_A i U_B wg schematu przedstawionego na rys.2, które wynoszą odpowiednio:

$$(8) \quad U_A = U_Z \cdot \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} \right) = \alpha \cdot U_Z$$

$$(9) \quad U_B = U_Z \cdot \left(\frac{R_X + r_p}{R_X + R_t + 2 \cdot r_p} \right),$$

gdzie: r_p - rezystancja przewodu, którym jest podłączony termorezystor.

Zależność $\Delta U_{(A-B)}$ po zastosowaniu podstawienia $\alpha = 1/2$ w przypadku aktywnego mostka pomiarowego jest równa:

$$(10) \quad \Delta U_{(A-B)} = U_Z \cdot \left(\frac{0,5 \cdot R_X + 0,5 \cdot R_t - R_X}{(R_X + R_t + 2 \cdot r_p)} \right) = \frac{U_Z}{2} \cdot \left(\frac{R_t - R_X}{R_X + R_t + 2 \cdot r_p} \right).$$

Na potrzeby stabilizacji wartości prądu I w gałęzi mostka, w której umieszczono termorezystor R_t , wyraża zależność wartości prądu I od napięcia U_{REF} .

$$(11) \quad U_{REF} = I \cdot R_X = \frac{U_Z}{R_X + R_t + 2r_p} \cdot R_X$$

$$(12) \quad U_Z = \frac{U_{REF} \cdot (R_X + R_t + 2r_p)}{R_X}$$

Wstawiając do wzoru (10) wyrażenie ze wzoru (12) otrzymuje postać:

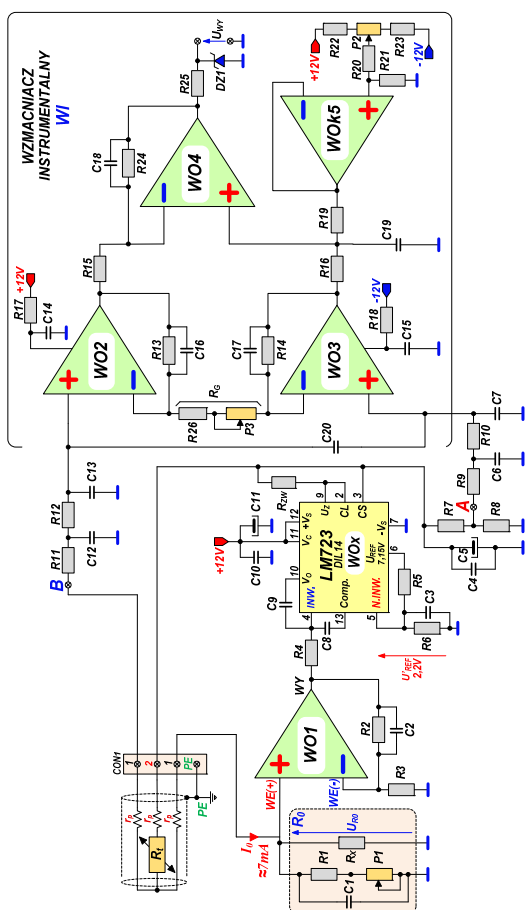
$$(13) \quad U_{WY} = \Delta U_{(A-B)} \cdot K_{WI} = (U_A - U_B) \cdot K_{WI} \\ = K_{WI} \cdot \frac{U_{REF}}{2} \cdot \left(\frac{R_t}{R_X} - 1 \right)$$

gdzie: K_{WI} – wartość wzmacnienia wzmacniacza WI, U_{REF} – napięcie odniesienia dla przyjętego zakresu pomiarowego.

W szczególności istotne jest to, że zależność (9), wynikająca z rozwiązania równania zapisanego w normie PN-EN-60751+A2 jest równa:

$$(14) \quad \left(\frac{R_t}{R_X} - 1 \right) = \frac{2 \cdot U_{WY}}{K_{WI} \cdot U_{REF}}$$

Z przedstawionej powyżej analizy wynika, że struktura aktywnego mostka pomiarowego (rys. 2) ze stabilizacją wartości prądu w gałęzi mostka, w której umieszczono termorezystor R_t , zapewnia napięcie wyjściowe U_{WY} w postaci dogodnej do podstawienia do wzoru (8).



Rys.3. Schemat ideowy mostkowego wzmacniacza pomiarowego ze stabilizacją prądu I opartego na układzie scalonym LM723

Realizacja aktywnego mostka pomiarowego na układzie scalonym LM723

Do budowy wzmacniacza pomiarowego wykorzystano układ scalony LM723 oraz wzmacniacz instrumentalny WI. Układ scalony LM723 to stabilizator napięcia zawierający w swojej strukturze:

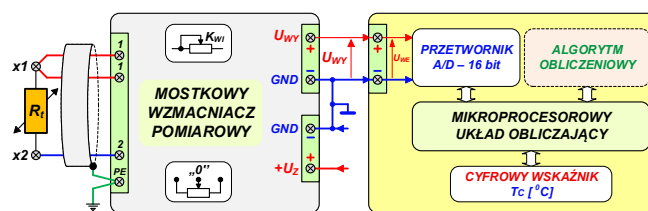
- wzmacniacz operacyjny WOX o maksymalnej wartości prądu wyjściowego $I = 150\text{mA}$,
- źródło napięcia odniesienia (stabilne temperaturowo) o wartości napięcia $U_{REF} = 7,15\text{V}$,
- wzmacniacz wyjściowy WOX posiada zabezpieczenie przeciwzwarciowe, jakie może pojawić się pomiędzy przewodami łączącymi czujnik Pt100 ze wzmacniaczem pomiarowym. Wartość prądu ograniczenia I_{ZW} ustala się wartością rezystora R_{ZW} ,
- wzmacniacz WOX posiada kompensację (kondensator C8), co skutecznie eliminuje możliwość wzbudzenia się wzmacniacza WOX.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat ideowy aktywnego mostka pomiarowego ze stabilizacją wartości prądu

I w gałęzi, w której umieszczono termorezystor Pt100. Istotnym ograniczeniem wynikającym z zastosowania układu scalonego LM723 jest to, że przystosowany jest on do zasilania tylko pojedynczym napięciem dodatnim. Dlatego wartość napięcia na wyprowadzeniach numer 4 i 5 tego układu scalonego musi być większa od wartości 2V.

Wartość prądu I_0 wymagana dla poprawnego działania układu zasilania mostka z termorezystorem Pt100 nie przekracza wartości $I_0 = 10\text{mA}$.

Po wykonaniu modułów elektronicznych należy przeprowadzić kalibrację całego toru pomiarowego. Na rysunku 4 został schematycznie przedstawiony cały układ pomiarowy.



Rys.4. Schemat blokowy układu połączeń mostkowego wzmacniacza pomiarowego oraz mikroprocesorowego układu obliczającego wartość temperatury

Dla przyjętego zakresu temperatur $T_C = 0 \div 600^\circ\text{C}$ wartość stałej kalibracyjnej S_K można obliczyć ze wzoru (14). Następnie na podstawie wzoru (15) należy oszacować wartości pośrednie napięć wyjściowych U_{WY} .

$$(15) \quad U_{WY} = \frac{(R_t - 1)}{B \cdot S_K} = 2,33961911006 \cdot \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)$$

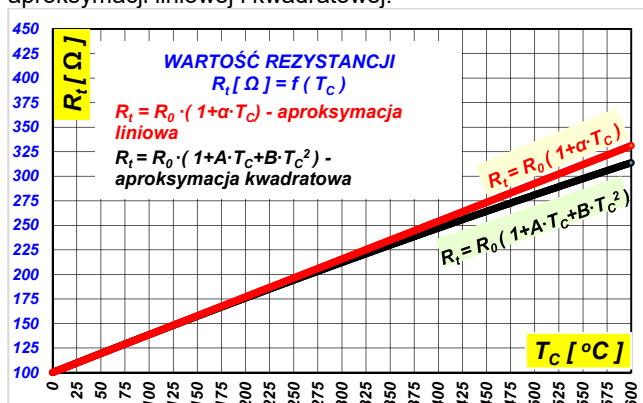
Tabela 1. Wartości pośrednie napięć $U_{WE/A/D}$

ZAKRES POMIARU $T_C = 0 \div 600^\circ\text{C}$			
$S_K = -740\ 121,212121$			
$B = -0,0000005775$			
$U_{WY} = U_{WE/A/D} = 5\text{V}$ dla $T_C = 600^\circ\text{C}$			
L.p.	$T_C [^\circ\text{C}]$	$R_t [\Omega]$	$U_{WY} [\text{V}]$
1	0	100,00	0,000000
5	200	175,86	1,774835
9	400	247,09	3,441348
13	600	313,71	5,000000

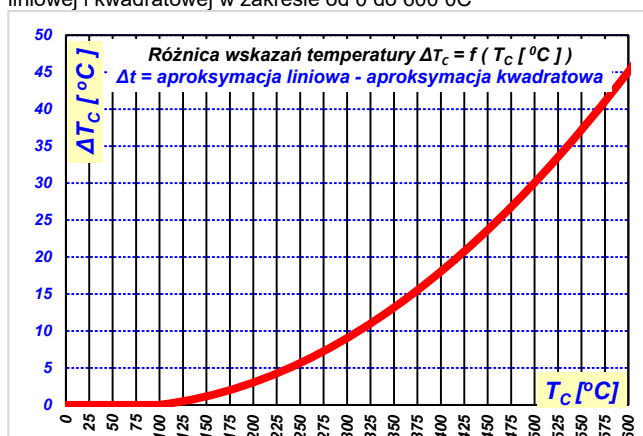
Podając na wejście przetwornika analogowo – cyfrowego A/D napięcie w zakresie $U_{WE/A/D} = 0 \div 5\text{V}$, otrzymuje się możliwość kontroli poprawnych pośrednich wskazań wartości temperatury T_C . Przykładowo, dla kalibracji wskazań układu przeliczającego przyjęto zależność: $T_C [^\circ\text{C}] = 0 \div 600 \rightarrow U_{WE/A/D} = 0 \div 5\text{V}$. W tabeli 1 przedstawiono obliczone wartości pośrednie napięcia U_{WE}

A/D dla zakresu pomiaru wartości temperatury $T_C = 0 \div 600^\circ\text{C}$.

Na rys. 5 przedstawiono zmianę wartości rezystancji $R_t[\Omega] = f(T_C)$ dla zmiany wartości temperatury przy aproksymacji liniowej i kwadratowej.



Rys.5. Zmiana wartości rezystancji $R_t = f(T_C)$ przy aproksymacji liniowej i kwadratowej w zakresie od 0 do 600 °C



Rys.6. Rozkład błęd wskazań temperatury Δt przy aproksymacji liniowej i kwadratowej

Wraz ze wzrostem wartości temperatury T_C , aproksymacja liniowa będzie powodowała zawyżanie wartości rezystancji R_t . Norma PN-EN-60751+A2 wprowadza możliwość przedstawiania charakterystyki termorezystora Pt100 z wykorzystaniem aproksymacji liniowej [12-14].

Na rysunku 6 przedstawiono przebieg różnicy wskazań temperatury ΔT_C przy aproksymacji liniowej i kwadratowej.

Po przeprowadzonej analizie widać wyraźnie, że stosowanie układu pomiarowego temperatury przedstawionego w tym artykule bardzo skutecznie zmniejsza wartość błęd pomiarowego wartości temperatury T_C .

Wnioski

W artykule przedstawiono układ mostka aktywnego, który umożliwia rozwiązanie istotnego problemu, polegającego na zapewnieniu poprawnych wskazań wartości temperatury w szeroki zakresie pomiarowym $T_C = 0 \div 600^\circ\text{C}$ dla czujnika temperatury Pt100 o własnościach zdefiniowanych normą (PN-EN-60751+A2). Przedstawiony układ mostka aktywnego jest połączeniem właściwości mostkowego wzmacniacza pomiarowego ze stabilizacją wartości prądu w gałęzi, w której umieszczono czujnik Pt100. W artykule skupiono się na porównaniu pomiaru temperatury w typowym mostku rezystancyjnym z pomiarem temperatury w opracowanym mostku aktywnym, który stał się też przedmiotem patentu [9,10]. Dla wykonanych prób, w których zweryfikowano poprawność

działania układu pomiaru temperatury z termorezystorem Pt100 i wyników otrzymanych w czasie ich przeprowadzania przeanalizowano jakość pomiarów w szerokim zakresie temperatur.

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; Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

LITERATURA

- [1] Chang H., Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress, Oxford University Press, (2004)
- [2] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J., McGhee J., Temperature Measurement, 2nd edn, Measurement Science and Technology, 13 (2002), 10
- [3] Górecki K., Ptak P., Janicki M., Napieralska N., Comparison of Properties for Selected Experimental Set-Ups Dedicated to Measuring Thermal Parameters of Power LEDs, *Energis*, 15 (2021)
- [4] Górecki P., Górecki K., Zarębski J., Accurate Circuit-Level Modelling of IGBTs with Thermal Phenomena Taken into Account, *Energis*, 14 (2021)
- [5] Górecki K., Influence of the Semiconductor Devices Cooling Conditions on Characteristics of Selected DC-DC Converters, *Energis*, 14 (2021)
- [6] Padilla B., Temperature sensing with thermistors, Texas Instruments, (2020)
- [7] Kufre Esenowo J., Nwangwu E. O., Israel Agwu Etu, Osuagwu E. U., A Simple Thermistor Design for Industrial Temperature Measurement, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11 (2016), pp 57-66
- [8] Wei Li, Shusheng Xiong, Xiaojun Zhou, Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs), *Sensors* (2020)
- [9] Maiti, T.K. A novel lead-wire-resistance compensation technique using two-wire resistance temperature detector. *IEEE Sens. J.* (2006), 6, 1454-1458
- [10] 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)
- [11] 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, pp. 1413-1419
- [12] Norma PN-EN-60751+A2
- [13] Piechowski L., Patent PL272139A1, opis patentowy (1988)
- [14] Piechowski L., Rządowski R., Patent PL226444B1, opis patentowy (2014)
- [15] Robert A., Troubleshooting Analog Circuits, Polish edition copyright 2005 by BTC Korporacja, (1991)
- [16] Camenzind H., Designing Analog Chips by Hans Camenzind, (2005) Polish edition copyright 2010 by BTC Korporacja,
- [17] Kitchin, Ch, Counts, L., A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers. 3rd Edition, Analog Devices 2006, Polish edition copyright 2009 by BTC Korporacja,
- [18] Carter B., Mancini R., OP AMPS for everyone, Texas Instruments Incorporated, 2008 Polish edition copyright 2011 by BTC Korporacja,