

## Nowy inteligentny przetwornik temperatury

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję inteligentnego przetwornika temperatury (IPT) z czujnikiem platynowym zasilanym ze źródła prądowego, w którym do minimalizacji błędu pomiaru zastosowano autorską procedurę autokalibracji. Wyniki badań symulacyjnych tego IPT porównano z wynikami IPT bazującego na mostku Wheatstone'a i autorskiej procedurze autokalibracji. Otrzymane wyniki badań jednoznacznie wskazują na lepsze właściwości przetwornika, w którym Pt zasilany jest z źródła prądowego.

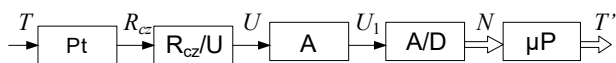
**Abstract.** The work presents the concept of an intelligent temperature transducer (ITT) with a platinum sensor powered by a current source, in which an original auto-calibration procedure was used to minimize the measurement error. The results of simulation tests of this ITT were compared with the results of ITT based on the Wheatstone bridge and the author's auto-calibration procedure. The obtained test results clearly indicate better properties of the transducer in which Pt is powered by a current source. (**New intelligent temperature transducer**).

**Słowa kluczowe:** pomiar temperatury, RDT, procedura autokalibracji.

**Keywords:** temperature measurement, RTD, auto-calibration procedure.

### Wstęp

Temperatura ( $T$ ) jest jedną z najczęściej mierzonych wielkości nieelektrycznych. W pomiarach  $T$  stosowane są różne rozwiązania sensorów temperatury, które ze względu na rodzaj sygnału wyjściowego dzieli się na nieelektryczne i elektryczne. W grupie sensorów elektrycznych istotną podgrupę, ze względu na ich relatywnie dobre właściwości metrologiczne i eksploatacyjne, stanowią rezystancyjne detektory temperatury (RDT) wykonane z platyny (Pt). Ich parametry są określone normą [1]. Stosowane są m.in. w przemyśle [2], [3], [4], [5], w ochronie środowiska [3], [6], [7], a także w inteligentnych budynkach [8].



Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika temperatury

Podstawowym blokiem przetwornika temperatury (PT) jest układ  $R_{cz}/U$  (rys.1), którym może być mostek Wheatstone'a [9]. Innym rozwiązaniem  $R_{cz}/U$  jest szeregowo połączenie RDT z rezystorem zasilanym ze źródła napięciowego [10] lub bezpośrednio połączenie RDT ze źródłem prądowym [11]. Na dokładność przetwarzania  $T$  przez PT, niezależnie od zastosowanego rozwiązania układu  $R_{cz}/U$ , mają wpływ m.in.: stabilność napięcia lub prądu zasilania układu  $R_{cz}/U$ , nieliniowość charakterystyki przetwarzania RDT i układu  $R_{cz}/U$ , błędy wzmacniacza  $A$ , dokładność przetwornika  $A/C$ , a także wpływ czynników zewnętrznych, np. temperatury, na poszczególne elementy PT.

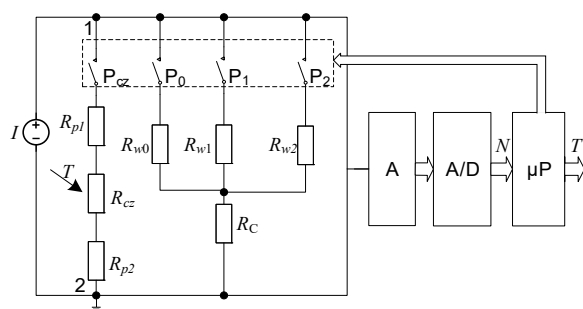
Najdokładniejsze RDT klasy AA, umożliwiają pomiar  $T$  w zakresie od  $-50\text{ °C}$  do  $+250\text{ °C}$  z dokładnością  $\pm(0,1+0,0017|T|)$ . Zastosowanie w pomiarach  $T$  tak dokładnych RDT wymaga realizacji odpowiedniej konstrukcji przetwornika temperatury (PT) (rys. 1), który powinien zapewniać taką dokładność pomiaru  $T$ , żeby jego błąd nie przekraczał 0,1 błędu RDT.

W artykule przedstawiono nowe rozwiązanie układu IPT oparte na autorskiej procedurze autokalibracji [12], która umożliwi minimalizację błędu pomiaru  $T$ , wynikającego m.in. z dokładności zastosowanych elementów oraz wpływu czynników zewnętrznych na PT. Określono skuteczność działania procedury autokalibracji oraz wymagania jakie powinny spełniać elementy toru pomiarowego nowego rozwiązania IPT. Otrzymane wyniki badań symulacyjnych

porównano z wynikami IPT bazującego na układzie mostka Wheatstone'a z zastosowaną procedurą autokalibracji [9], [12].

### Budowa i zasada działania IPT

Na rysunku 2 przedstawiono schemat nowego IPT realizującego procedurę autokalibracji [12], w którym RDT stanowi część układu  $R_{cz}/U$ . Jest on zasilany ze źródła prądowego  $I$  po włączeniu przełącznika  $P_{cz}$ , sterowanego mikroprocesorem ( $\mu P$ ). Druga część układu  $R_{cz}/U$ , związana z procedurą autokalibracji, składa się z rezystorów wzorcowych  $R_{wj}$  ( $j = 0..2$ ), których liczba wynika z przyjętego 2-go stopnia wielomianu opisującego charakterystykę przetwarzania IPT. Poszczególne rezystory wzorcowe są również zasilane ze źródła prądowego  $I$  przez odpowiednie przełączniki  $P_j$ , sterowane  $\mu P$ . Pozostała część IPT stanowi typowe rozwiązanie układowe stosowane w PT.



Rys. 2. Schemat układu IPT

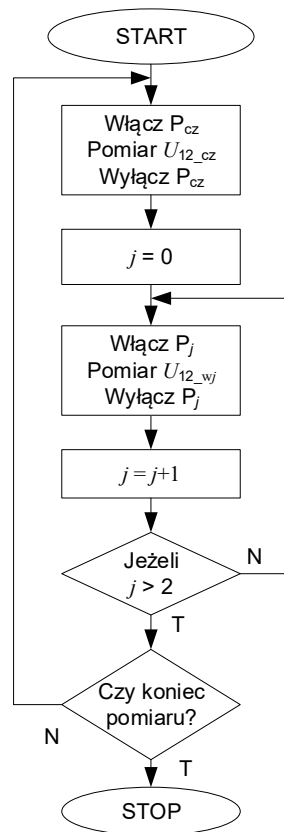
Przedstawiony na rysunku 3 algorytm procedury autokalibracji (cz. 1) dotyczy sterowania pracą układu  $R_{cz}/U$ . Wynikiem jego działania są wartości zmierzonych napięć pomiędzy węzłami 1 i 2 (rys. 2) określone równaniami:

$$(1) \quad U_{12\_cz} = I(R_{cz} + R_{p1} + R_{p2} + R_{Pcz}),$$

$$(2) \quad U_{12\_wj} = I(R_{wj} + R_C + R_{Pj}),$$

gdzie:  $R_{cz}$  – wartość rezystancji RTD dla aktualnie mierzonej temperatury  $T$ ;  $R_{p1}$  i  $R_{p2}$  – rezystancje przewodów łączących

RTD pomiędzy węzłami 1 i 2;  $R_{Pcz}$  – rezystancja przełącznika  $P_{cz}$  w stanie załączenia;  $R_{wj}$  – rezystancje rezystorów wzorcowych, których wartości wyznaczono na podstawie charakterystyki czujnika Pt [1] przy założonych odpowiednio wartościach temperatur wzorcowych  $T_{wj}$ , mieszczących się w całym zakresie pomiarowym IPT;  $R_{Pj}$  – rezystancja przełącznika  $P_j$  w stanie załączenia;  $R_C$  – wartość rezystancji pętli kompensacyjnej równa sumie rezystancji przewodów łączących  $R_{p1} + R_{p2} = R_p$ .



Rys. 3. Algorytm procedury autokalibracji (cz. 1) - sterowanie układem  $R_{cz}/U$

Otrzymane wartości napięć  $U_{12\_cz}$  i  $U_{12\_wj}$  są wzmacniane przez wzmacniacz (A) i przetwarzane w przetworniku A/D na wartości cyfrowe ( $N_{cz}$ ,  $N_{wj}$ ), które są zapisywane w pamięci układu mikroprocesora (uP) i wraz z określonymi wartościami temperatur wzorcowych  $T_{wj}$  stanowią w cz. 2 algorytmu procedury autokalibracji podstawę obliczenia z układu równań (3) aktualnych wartości współczynników (od  $a_0$  do  $a_2$ ) wielomianu (4) opisującego charakterystykę całego toru przetwarzania, a następnie z (4) wartość zmierzonej temperatury  $T'$ .

$$(3) \quad \begin{aligned} a_0 + a_1 T_{w0} + a_2 T_{w0}^2 &= N_{w0}, \\ a_0 + a_1 T_{w1} + a_2 T_{w1}^2 &= N_{w1}, \\ a_0 + a_1 T_{w2} + a_2 T_{w2}^2 &= N_{w2}. \end{aligned}$$

$$(4) \quad a_0 + a_1 T' + a_2 T'^2 = N_{cz}.$$

### Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono dla IPT, którego schemat przedstawiono na rys. 1. W celu porównania właściwości analizowanego IPT z przetwornikiem

temperatury zbudowanym na bazie mostka [9] przyjęto ten sam zakres pomiarowy (od 0 °C do +200 °C) i zastosowano dwuprzewodowy czujnik Pt1000. Przyjęto, że w warunkach znamionowych (prąd zasilania układu  $I_{zn} = 0,565$  mA i temperatura otoczenia  $T_a = 25$  °C) zastosowane elementy w IPT mają następujące parametry:

- suma rezystancji przewodów łączących czujnik z układem i przełącznika  $P_{cz}$  w stanie załączenia,  $R_p + R_{Pcz} = 0,12 \Omega$ ,
- suma rezystancji pętli kompensacyjnej i przełącznika  $P_{wj}$  w stanie załączenia,  $R_C + R_{Pwj} = 0,12 \Omega$ ,
- napięcie zerowe wzmacniacza (A)  $U_0 = 0$  mV i jego wzmocnienie  $G_{zn} = 1$  V/V,
- wartości znamionowe rezystorów wzorcowych i odpowiadające im temperatury wzorcowe:
  - $R_{w0zn} = 1020 \Omega \rightarrow T_{w0} = 5,121$  °C,
  - $R_{w1zn} = 1370 \Omega \rightarrow T_{w1} = 96,033$  °C,
  - $R_{w2zn} = 1720 \Omega \rightarrow T_{w2} = 189,531$  °C,
- wartość  $TCR_{wj} = 2,5$  ppm.

W przeprowadzonych analizach nie uwzględniano dokładności przetwornika A/D.

Przeprowadzono również badania symulacyjne dla obu wymienionych wyżej przetworników, w których układy  $R_{cz}/U$  nie zawierały elementów związanych z realizacją procedury autokalibracji, czyli klasycznych PT. Celem tych badań było porównanie wartości błędów pomiaru temperatury  $\Delta_T$  w przypadku nie stosowania procedury autokalibracji w obu PT.

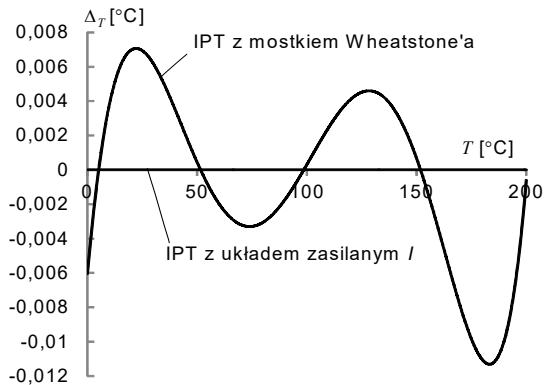
W przypadku braku procedury autokalibracji otrzymano następujące wartości  $\Delta_T$ :

- a. Dla PT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym prądem  $I$ :
  - $-3,5 \cdot 10^{-13} \text{ °C} \div 3,1 \cdot 10^{-13} \text{ °C}$  dla warunków znamionowych,
  - $-2,4 \text{ °C} \div -1,3 \text{ °C}$  dla  $I = 0,995 I_{zn}$ ,
  - $-4,8 \text{ °C} \div 2,6 \text{ °C}$  dla  $G = 0,99 G_{zn}$ ,
  - $-36 \text{ °C} \div -38 \text{ °C}$  dla  $U_0 = -80$  mV.
- b. Dla PT z układem mostka Wheatstone'a zasilanym  $U$ :
  - $-0,011 \text{ °C} \div 0,0071 \text{ °C}$ , dla warunków znamionowych,
  - $-1,4 \text{ °C} \div 0,0065 \text{ °C}$  dla  $U = 0,995 U_{zn}$ ,
  - $-2,8 \text{ °C} \div 0,0065 \text{ °C}$  dla  $G = 0,99 G_{zn}$ ,
  - $-1,2 \text{ °C} \div -2,3 \text{ °C}$  dla  $U_0 = -80$  mV.

Przy braku procedury autokalibracji PT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  charakteryzuje się w warunkach znamionowych bardzo małymi wartościami  $\Delta_T$  na poziomie  $10^{-13}$  °C w porównaniu do PT z układem mostka Wheatstone'a. Dla pozostałych trzech analizowanych przypadków przetwornik PT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  charakteryzuje się dużo większymi wartościami  $\Delta_T$  w porównaniu do PT z układem mostka Wheatstone'a.

Natomiast przy zastosowaniu procedury autokalibracji dla obu analizowanych IPT otrzymane wyniki z symulacji przedstawiono na kolejnych rysunkach.

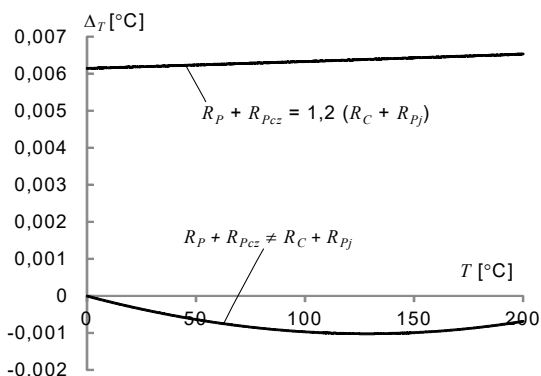
W warunkach znamionowych (rys. 4) dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  wartości  $\Delta_T$  są zawarte w przedziale  $-8,5 \cdot 10^{-13} \text{ °C} \div 5,1 \cdot 10^{-13} \text{ °C}$ . Natomiast dla IPT z układem mostka Wheatstone'a wartości  $\Delta_T$  są zawarte w przedziale  $-0,011 \text{ °C} \div 0,0071 \text{ °C}$ . Dla obu układów IPT wartości  $\Delta_T$  są odpowiednio takie same jak w warunkach znamionowych również dla przypadków takich samych zmian wartości zasilania, wzmocnienia  $G$  i napięcia zerowego  $U_0$  obu układów. W obu układach zastosowanie procedury autokalibracji zwiększyło dokładność pomiaru  $T$ .



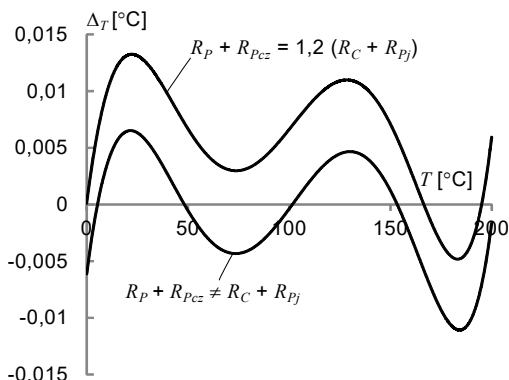
Rys. 4. Charakterystyka  $\Delta_T = f(T)$  dla warunków znamionowych

Kolejne wyniki badań symulacyjnych dotyczyły określenia wpływu dwóch przyjętych przypadków rozbieżności sumy rezystancji  $R_P + R_{Pcz}$  w stosunku do sumy  $R_C + R_{Pj}$  dla obu analizowanych IPT (rys. 5 i rys. 6). Pierwszy dotyczy 20 % wzrostu sumy rezystancji  $R_P + R_{Pcz}$  w stosunku do sumy  $R_C + R_{Pj}$ . W drugim przypadku przyjęto różne wartości sum rezystancji, które określono na podstawie następujących wyników pomiarów w wykonanym praktycznie IPT z mostkiem Wheatstone'a:

$$\begin{aligned} R_P + R_{Pcz} &= 0,11777 \, \Omega, & R_C + R_{P0} &= 0,11809 \, \Omega, \\ R_C + R_{P1} &= 0,12140 \, \Omega, & R_C + R_{P2} &= 0,12064 \, \Omega, \\ R_C + R_{P3} &= 0,11536 \, \Omega, & R_C + R_{P4} &= 0,12307 \, \Omega. \end{aligned}$$



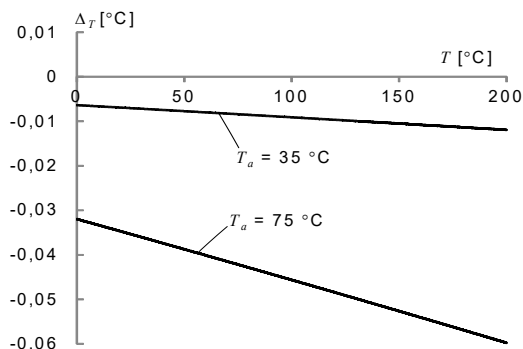
Rys. 5. Charakterystyka  $\Delta_T = f(T)$  dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  i z wpływem rozbieżności rezystancji  $R_P + R_{Pcz}$  w stosunku do  $R_C + R_{Pj}$



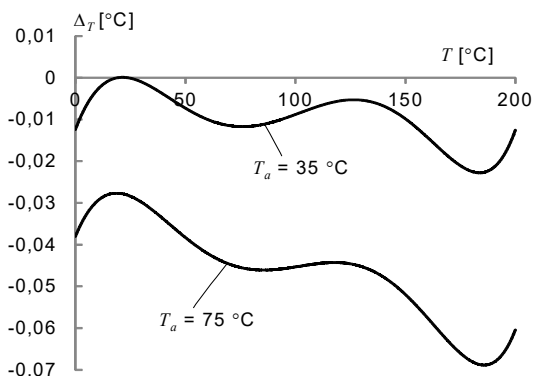
Rys. 6. Charakterystyka  $\Delta_T = f(T)$  dla IPT z układem mostka Wheatstone'a i z wpływem rozbieżności rezystancji  $R_P + R_{Pcz}$  w stosunku do  $R_C + R_{Pj}$

Pierwsze cztery wartości tych sum zastosowano w badaniach symulacyjnych IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$ . Mniejsze wartości  $\Delta_T$  otrzymano dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  (rys. 5).

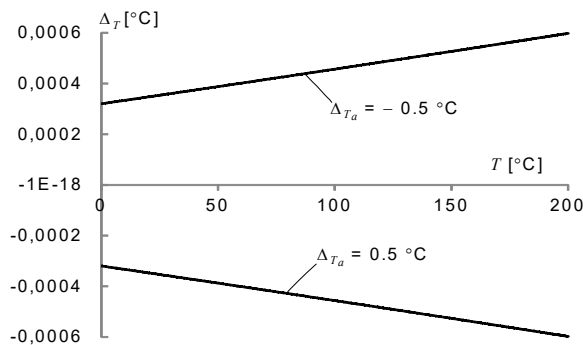
Istotnym elementem wpływającym na dokładność IPT jest układ realizujący procedurę autokalibracji. W tym zakresie zbadano wpływ temperatury otoczenia  $T_a$  na rezystory wzorcowe  $R_{wj}$  oraz wpływ dokładności wyznaczenia wartości rezystancji  $R_{wj}$ . Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wpływ  $T_a$  na błąd  $\Delta_T$  w całym zakresie pomiarowym dla obu układów IPT.



Rys. 7. Charakterystyka  $\Delta_T = f(T)$  dla  $T_a = 35 \, ^\circ\text{C}$  i  $T_a = 75 \, ^\circ\text{C}$  dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$



Rys. 8. Charakterystyka  $\Delta_T = f(T)$  dla  $T_a = 35 \, ^\circ\text{C}$  i  $T_a = 75 \, ^\circ\text{C}$  dla IPT z układem mostka Wheatstone'a

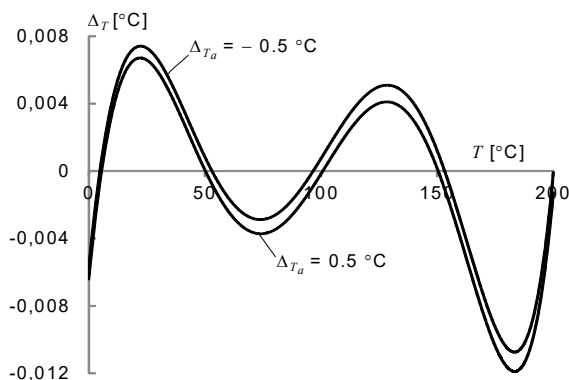


Rys. 9. Charakterystyka  $\Delta_T = f(T)$  przy  $T_a = 75 \, ^\circ\text{C}$  dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  dla granicznych wartości  $\Delta T_a$  równych  $-0,5 \, ^\circ\text{C}$  i  $+0,5 \, ^\circ\text{C}$

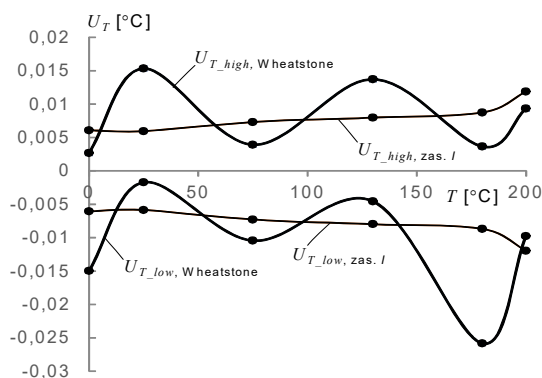
W obu wersjach IPT wpływ  $T_a$  jest podobny i stosunkowo duży. To spowodowało przyjęcie podobnego rozwiązania dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  jak dla IPT z układem mostka Wheatstone'a [9], związanego z pomiarem  $T_a$  w pobliżu rezystorów wzorcowych, z dokładnością  $\pm 0,5 \, ^\circ\text{C}$ . Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wpływ  $T_a = 75 \, ^\circ\text{C}$  na błąd  $\Delta_T$  w całym zakresie pomiarowym dla obu układów IPT dla granicznych wartości błęd pomiaru  $T_a$ . Ponad 10 razy mniejsze wartości błęd  $\Delta_T$

otrzymano dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  w porównaniu do błędów otrzymanych dla IPT z mostkiem.

Na rys. 11 przedstawiono wyniki badań związane z dokładnością pomiaru wartości rezystorów wzorcowych  $R_{wvj}$ . Zastosowane  $R_{wvj}$  w procedurze autokalibracji zostały zmierzone multimetrem Agilent 3458A z dokładnością 0,002 %. Przedziały niepewności ( $U_{T\_low}; U_{T\_high}$ ) wyznaczono symulacyjnie z zastosowaniem metody Monte Carlo, w sposób przedstawiony w [9], dla prawdopodobieństwa 99 %. Otrzymane wyniki  $U_T$  dla obu analizowanych IPT przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 10. Charakterystyka  $\Delta T = f(T)$  przy  $T_a = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  dla IPT z układem mostka Wheatstone'a  $I$  dla granicznych wartości  $\Delta T_a$  równych  $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $+0,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 11. Charakterystyka  $U_T = f(T)$  dla IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  oraz dla IPT z mostkiem Wheatstone'a

W przypadku IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  niepewność pomiaru  $T$  zawarta jest w przedziale  $\pm 0,006 \text{ }^\circ\text{C}$   $\div$   $\pm 0,012 \text{ }^\circ\text{C}$ . Natomiast dla IPT z układem mostka Wheatstone'a zawarta jest w przedziale od  $-0,026 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $+0,015 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych jednoznacznie wskazują, że IPT z układem  $R_{cz}/U$  zasilanym  $I$  umożliwia osiągnięcie większych dokładności pomiaru  $T$  niż IPT z układem mostka Wheatstone'a. Otrzymane wartości  $\Delta T$  i  $U_T$  stanowią podstawę budowy IPT, który umożliwi współpracę z czujnikami Pt klasy AA.

**Autorzy:** dr hab. inż. Wiesław Miczulski, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. Szafrana 2, 65-156 Zielona Góra, E-mail: W.Miczulski@imei.uz.zgora.pl; dr inż. Mariusz Krajewski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-156 Zielona Góra, E-mail: M.Krajewski@imei.uz.zgora.pl; dr hab. inż. Sergiusz Sienkowski, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-156 Zielona Góra, E-mail: S.Sienkowski@imei.uz.zgora.pl.

### LITERATURA

- [1] Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors, *International Standard IEC 60751* (2022)
- [2] D'Aleo F. P., Stalder R., H.-M. Prasser, Design and development of resistive temperature detector arrays on aluminium substrates. Measurements in mixing experiments, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 45, (2015), 176-187, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.011
- [3] Kang L., Shi Y., Zhang J., Huang Ch., Zhang N., He Y., Li W., Wang Ch., Wu X., Zhou X., A flexible resistive temperature detector (RTD) based on in-situ growth of patterned Ag film on polyimide without lithography, *Microelectronic Engineering*, vol. 216 (2019), doi: 10.1016/j.mee.2019.111052
- [4] Siddique A., Khan S. A., Subhani H., Design and Analysis of PLC Based Industrial Control System, *Pakistan journal of emerging science and technology*, vol. 2, no. 1 (2023), 72-82, doi: 10.58619/pjest.v2i1.137
- [5] Nagarajan P. R., George B., Kumar V. J., Improved single-element resistive sensor-to-microcontroller interface, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.66, no. 10, (2017) 2736-2744,
- [6] Fumeaux N., Kossairi M., Bourelly J., Briand D., Printed ecoresorbable temperature sensors for environmental monitoring, *Micro and Nano Engineering*, vol. 20 (2023) doi: 10.1016/j.mne.2023.100218
- [7] Wen C., Yao S., Wei M., Research on the Compliance Judgment of Indication Error of Calibration Result of Platinum Resistance Air Temperature Sensor, *2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, Nanjing, China (2021) 401-406, doi: 10.1109/ICEMI52946.2021.9679584
- [8] Babaie B., Masoumi N., „An Analytical Approach for Extraction of the Temperature Bias-Error of RTD Sensors for Smart Home”, *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tabriz, Iran (2020) 1-5, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260942
- [9] Miczulski W., Krajewski M. Sienkowski S., A New Autocalibration Procedure in Intelligent Temperature Transducer, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 3, (2019) 895-902, doi: 10.1109/TIM.2018.2857901
- [10] Reverter F., A Front-End Circuit for Two-Wire Connected Resistive Sensors with a Wire-Resistance Compensation, *Sensors*, vol.23, no.19, (2023) 8228, <https://doi.org/10.3390/s23198228>
- [11] *A Basic Guide to RTD Measurements*, SBAA275A – JUNE 2018 – REVISED MARCH 2023, <https://www.ti.com/lit/an/sbaa275a/sbaa275a.pdf?ts=1718531719599>
- [12] Miczulski W., Sposób pomiaru wielkości nieelektrycznej czujnikiem rezystancyjnym w układzie mostkowym, patent PAT.229338 (2018)