

## Badania in situ rezystancji termicznej rezystancyjnych czujników temperatury

**Streszczenie.** W rezystancyjnych czujnikach temperatury, takich jak popularny Pt100, efekt samonagrzewania powoduje błędy pomiaru temperatury. Wartość tych błędów zależy od prądu pomiarowego czujnika i jego rezystancji termicznej. Prąd pomiarowy czujnika Pt100 należy ograniczyć do takiej wartości, przy której samonagrzewanie nie przekracza 25% wartości tolerancji dla zadeklarowanej klasy tolerancji. Spełnienie tego warunku wymaga znajomości rezystancji termicznej czujnika wyznaczonej in situ.

**Abstract.** In resistance temperature detectors, such as the popular Pt100, the self-heating effect causes temperature measurement errors. The value of these errors depends on the sensor's measuring current and thermal resistance. The measuring current of a Pt100 sensor shall be limited to a value at which the self-heating does not exceed 25% of the tolerance value of the declared tolerance class. Meeting this requirement requires knowledge of the in situ thermal resistance of the sensor. (*In situ investigation of thermal resistance of resistance temperature detectors*).

**Słowa kluczowe:** rezystancyjne czujniki temperatury, efekt samonagrzewania, rezystancja termiczna, badania in situ.

**Keywords:** resistance temperature detectors RTD, self-heating effect, thermal resistance, in situ research.

### Wstęp

Termorezystancyjne czujniki temperatury, a wśród nich przede wszystkim metalowe czujniki platynowe, obok miedzianych i niklowych oraz czujniki półprzewodnikowe (termistory), znajdują obecnie dwa główne zastosowania: jako czujniki termometrów wzorcowych (standard platinum resistance thermometers SPRTs) [1-5] oraz czujniki przemysłowe (industrial platinum resistance thermometers IPRTs) [6-9]. Czujniki metalowe (platynowe, miedziane i niklowe) różnią się wieloma właściwościami od czujników półprzewodnikowych (termistorów), ale dla obu tych rodzajów czujników stosuje się praktycznie te same układy pomiarowe [4].

Podstawowym obszarem zastosowań czujników wzorcowych SPRTs jest realizacja skali temperatury ITS-90, opisana w serii przewodników Międzynarodowego Biura Miar i Wąg BIPM [1-5]. Wzorcowe termometry platynowe SPRTs skalibrowane w określonych punktach stałych oraz przy użyciu odpowiednich procedur interpolacyjnych [5] stosuje się do odtwarzania skali temperatury ITS-90 w zakresie temperatur pomiędzy punktem potrójnym równowagi wodoru (13,8033 K) a temperaturą krzepnięcia srebra (1234,93 K) [1]. Typowe SPRTs mają rezystancję 25  $\Omega$  w punkcie potrójnym wody (273,16 K) lub w przedziale od 0,2  $\Omega$  do 2,5  $\Omega$  dla czujników pracujących w górnym zakresie temperatur [2]. Wymagania stawiane czujnikom przemysłowym IPRTs są zawarte w licznych normach, z których najczęściej stosowane są: norma europejska [6] i normy amerykańskie [7, 8]. Normy te są ze sobą w dużej części zgodne, jednak różnią się istotnie w zakresie definicji klas tolerancji [9]. Typowa wartość rezystancji IPRTs w temperaturze 0  $^{\circ}\text{C}$  wynosi 100  $\Omega$ , ale dopuszcza się również wartości 10  $\Omega$ , 500  $\Omega$  oraz 1000  $\Omega$ .

Czujniki rezystancyjne są to czujniki pasywne, dlatego wymagają odpowiedniego zasilania. W celu pomiaru rezystancji należy przepuścić przez ten czujnik odpowiednio dobrany prąd i zmierzyć powstały na czujniku spadek napięcia. Prąd przepływający przez rezystancję czujnika powoduje wydzielanie się ciepła i wzrost temperatury czujnika, czyli efekt samonagrzewania (self heating effect).

### Effekt samonagrzewania w SPRTs

Ponieważ pomiar rezystancji czujnika platynowego wymaga przepuszczenia prądu przez jego element czynny, skutkuje to wydzielaniem się w nim określonej ilości ciepła.

W rezultacie czujnik nagrzewa się powyżej temperatury otoczenia. Wewnętrzny efekt samonagrzewania jest określony przepływem ciepła pomiędzy platynowym elementem czynnym, a obudową czujnika i wynika wyłącznie z konstrukcji czujnika. Zewnętrzny efekt samonagrzewania wynika z przepływu ciepła pomiędzy obudową czujnika, a jego otoczeniem i wynika ze sposobu zamocowania czujnika oraz parametrów fizycznych otaczającego go medium. Dla dostępnych obecnie SPRTs o typowej rezystancji 25  $\Omega$ , przy zalecanym prądzie pomiarowym 1 mA, efekt samonagrzewania wynosi od 0,2 mK do 4 mK [2]. Jest to wartość zbyt duża na potrzeby dokładnych pomiarów oraz do realizacji skali ITS-90, dlatego należy zastosować odpowiednią korekcję tego błędu. Powszechnie stosowaną metodą jest dwukrotny pomiar rezystancji czujnika  $R_1$  i  $R_2$  przy dwóch różnych wartościach prądu  $I_1$  i  $I_2$ , a następnie obliczenie rezystancji  $R_0$  odpowiadającej zerowej wartości prądu, przy której efekt samonagrzewania nie występuje [2]:

$$(1) \quad R_0 = \frac{R_2 I_1^2 - R_1 I_2^2}{I_1^2 - I_2^2}.$$

Powszechnie stosowany jest stosunek prądów  $I_2/I_1$  równy  $\sqrt{2}$ , co znacznie upraszcza obliczenia, sprowadzając je do jednej operacji odejmowania. Niektórzy autorzy zalecają jednak inne wartości prądów lub więcej niż dwa pomiary przy różnych wartościach prądów [10-15].

W roli wtórnych wzorców temperatury dopuszcza się również stosowanie przemysłowych platynowych termometrów rezystancyjnych IPRTs [3] oraz termistorów [4]. Czujniki IPRTs charakteryzują się większym samonagrzewaniem od SPRTs. Przy typowej rezystancji 100  $\Omega$  efekt samonagrzewania wynosi od 2 mK do 20 mK przy prądzie pomiarowym 1 mA [3]. Szczególnie istotnym problemem jest samonagrzewanie termistorów NTC, ze względu na ich silnie nieliniową charakterystykę [4].

Samonagrzewanie czujników rezystancyjnych wyraża się liczbowo na dwa sposoby, podając:

- współczynnik samonagrzewania, jednostka  $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$ , lub
- stałą rozpraszania, jednostka  $\text{mW}/^{\circ}\text{C}$ .

Należy zauważyć, że współczynnik samonagrzewania jest równoważny pojęciu rezystancji termicznej, która w układzie SI ma jednostkę K/W, jednak bardziej praktyczną liczbowo

jednostką jest °C/mW. Dla czujników wzorcowych SPRTs współczynnik samonagrzewania przyjmuje wartości od 0,003 °C/mW do 0,25 °C/mW, zależnie od konstrukcji czujnika, sposobu jego montażu i parametrów medium w którym dokonywany jest pomiar [3].

### Efekt samonagrzewania w IPRTs

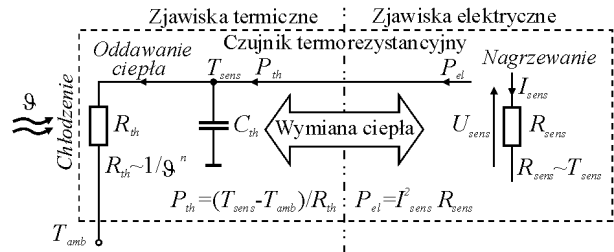
Efekt samonagrzewania w czujnikach przemysłowych IPRTs ma taką samą naturę fizyczną jak w czujnikach wzorcowych SPRTs. Jednak ze względu na przeznaczenie, czujniki przemysłowe mają inną konstrukcję dla uzyskania lepszej odporności na szoki termiczne, drgania, wibracje, wysokie ciśnienie itp. Dlatego generalnie w czujnikach przemysłowych efekt samonagrzewania jest silniejszy. Zgodnie z normą europejską [6] współczynnik samonagrzewania dla czujników IPRTs należy wyznaczyć w temperaturze pomiędzy 0 °C a 30 °C, w powietrzu przepływającym z prędkością (3±0,3) m/s oraz/lub w wodzie przepływającej z prędkością >0,2 m/s. Samonagrzewanie czujnika w tych warunkach nie powinno przekraczać 25% wartości tolerancji wynikającej z deklarowanej klasy tolerancji czujnika, przy maksymalnym deklarowanym prądzie pomiarowym. Zazwyczaj prąd ten nie przekracza 1 mA dla czujnika o rezystancji 100 Ω. Należy jednak zauważyć, że klasy tolerancji w normach europejskiej [6] i amerykańskiej [7] różnią się [9]. Zgodnie z normą amerykańską [7, 8] samonagrzewanie czujnika należy wyznaczyć w temperaturze 25 °C, w wodzie przepływającej z prędkością 1 m/s lub w powietrzu przepływającym z prędkością (5±0,5) m/s. Samonagrzewanie w podanych warunkach nie powinno przekroczyć 1 °C przy mocy 33 mW wydzielanej w czujniku przez prąd pomiarowy.

Porównując samonagrzewanie czujników wzorcowych i przemysłowych należy zwrócić uwagę na dokładności pomiarów. Dla czujników wzorcowych typowa niepewność pomiarowa wynosi 0,5 mK w zakresie temperatur od 14 K do 900 K [6]. Natomiast tolerancja dla czujników przemysłowych w temperaturze 0 °C wynosi od ±0,1 °C do ±0,6 °C oraz na końcu zakresu pomiarowego od ±0,36 °C do ±6,6 °C, zależnie od klasy tolerancji. Pomijając fakt, że nie można wprost porównywać niepewności pomiarowej z dopuszczalną tolerancją, którą należy rozumieć jako dopuszczalny błąd graniczny, to jest oczywisty zupełnie inny cel badania samonagrzewania czujników wzorcowych i przemysłowych. Samonagrzewanie czujników wzorcowych bada się w celu skorygowania błędu pomiarowego, natomiast dla czujników przemysłowych w celu utrzymania błędów pomiarowych na odpowiednio niskim poziomie, bez ich korygowania. Według normy [6] należy dobrać tak małą wartość prądu pomiarowego aby samonagrzewanie czujnika nie przekraczało 25% wartości tolerancji wynikającej z deklarowanej klasy tolerancji czujnika. Z drugiej jednak strony, większy prąd pomiarowy zapewnia większą dokładność pomiaru rezystancji czujnika. Ustalenie optymalnej wartości prądu pomiarowego wymaga znajomości rezystancji termicznej czujnika, która silnie zależy od sposobu montażu czujnika i parametrów otaczającego go medium. Z tego powodu, podany w karcie katalogowej współczynnik samonagrzewania czujnika, wyznaczony przez producenta zgodnie z normami [6-8], jest dla użytkownika całkowicie nieprzydatny w większości praktycznych zastosowań. Dlatego, w celu odpowiedniego doboru prądu pomiarowego, może być konieczne wyznaczenie in situ rezystancji termicznej czujnika.

### Wyznaczanie in situ rezystancji termicznej czujników

Czujnik termorezystancyjny pracuje na styku dwóch obszarów; zjawisk elektrycznych i termicznych (rys. 1). Prąd

$I_{sens}$  płynący przez rezystancję czujnika  $R_{sens}$  powoduje wydzielenie się mocy elektrycznej  $P_{el}=I_{sens}^2 R_{sens}$ , która zamienia się w moc cieplną  $P_{th}$ . Moc cieplna  $P_{th}$  przepływając przez rezystancję termiczną  $R_{th}$  czujnika wytwarza różnicę temperatur pomiędzy temperaturą czujnika  $T_{sens}$  a temperaturą otoczenia  $T_{amb}$ . Czujnik osiąga stan ustalony gdy w pojemności cieplnej  $C_{th}$  czujnika zostanie zgromadzona odpowiednia ilość ciepła, przy której moc elektryczna  $P_{el}$  i cieplna  $P_{th}$  zrównają się, czyli cała moc nagrzewania czujnika będzie odprowadzana do otoczenia.



Rys.1. Zjawiska elektryczne i termiczne w czujniku rezystancyjnym

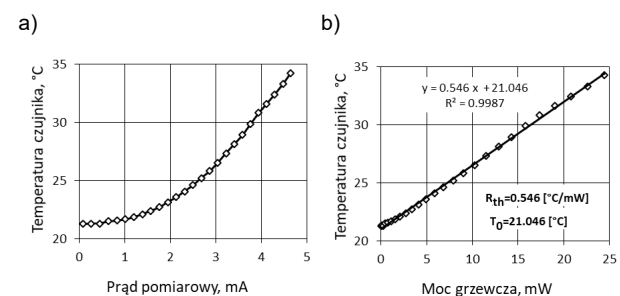
Rezystancja termiczna czujnika  $R_{th}$  jest równa stosunkowi różnicy temperatury czujnika  $T_{sens}$  i otoczenia  $T_{amb}$  do mocy  $P_{th}=P_{el}=I_{sens}^2 R_{sens}$  nagrzewającej czujnik:

$$(2) \quad R_{th} = \frac{T_{sens} - T_{amb}}{P_{el}} = \frac{T_{sens} - T_{amb}}{I_{sens}^2 R_{sens}}$$

Temperatura czujnika  $T_{sens}$  jest zawsze wyższa od mierzonej temperatury otoczenia  $T_{amb}$ , co skutkuje błędami pomiaru spowodowanymi efektem samonagrzewania. Temperatura czujnika  $T_{sens}$  jest liniowo zależna od mocy grzania  $P_{el}$ , a przy założeniu niewielkich zmian rezystancji  $R_{sens}$  czujnika zależy ona od kwadratu prądu  $I_{sens}$  płynącego przez czujnik:

$$(3) \quad T_{sens} = R_{th} P_{el} + T_{amb} = R_{th} I_{sens}^2 R_{sens} + T_{amb} = ax + b$$

Zależność (3) pozwala na wyznaczenie in situ rezystancji termicznej  $R_{th}$  czujnika w sposób objaśniony na rysunku 3. W pierwszej kolejności należy wykonać badanym czujnikiem serię pomiarów temperatury przy narastających wartościach prądu  $I_{sens}$ . Przykładowy wykres pokazano na rysunku 2a. Następnie należy dla każdej wartości prądu  $I_{sens}$  obliczyć moc grzewczą  $P_{el}$  uwzględniając zmieniającą się rezystancję  $R_{sens}$  czujnika (3) i wykonać wykres temperatury czujnika  $T_{sens}$  w funkcji mocy grzewczej  $P_{el}$ , który ostatecznie aproksymuje się linią prostą  $y=ax+b$  metodą najmniejszych kwadratów (rys. 2b). Poszukiwana rezystancja termiczna czujnika jest równa współczynnikowi kierunkowemu linii prostej  $R_{th}=a$ , natomiast wyraz wolny jest równy mierzonej temperaturze otoczenia pozbawionej wpływu efektu samonagrzewania  $T_{amb}=b$ .



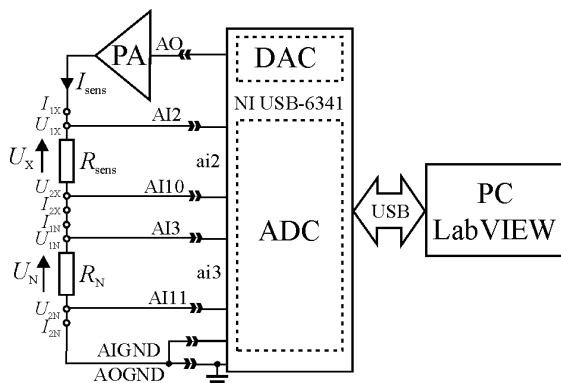
Rys.2. Wykresy do wyznaczania rezystancji termicznej czujnika

Zamiast proponowanej na rysunku 2b postaci wykresu, w literaturze można spotkać się z wykresem zależności rezystancji  $R_{sens}$  czujnika w funkcji prądu pomiarowego  $I_{sens}$ , który następnie autorzy aproksymują wielomianem drugiego stopnia stosując metodę najmniejszych kwadratów [12, 14]. Zakłada się przy tym, że moc grzania  $P_{el}$  jest proporcjonalna do kwadratu prądu  $I_{sens}$ , co nie jest prawdą, gdyż czujnik jest elementem nieliniowym i jego rezystancja  $R_{sens}$  również jest zależna od wartości prądu  $I_{sens}$ . Takie podejście można więc zastosować tylko dla małych zmian wartości prądu  $I_{sens}$ .

Należy również zauważyć, że znajomość rezystancji termicznej  $R_{th}$  czujnika ma znaczenie nie tylko przy badaniu efektu samonagrzewania w stanie statycznym, ale wpływa ona też na właściwości dynamiczne czujnika. Rezystancja termiczna  $R_{th}$  w połączeniu z pojemnością cieplną  $C_{th}$  czujnika (rys. 1) tworzy układ inercyjny pierwszego rzędu, co ma znaczenie przy planowaniu szybkości wykonywania pomiarów temperatury [16]. Dodatkowo, ponieważ rezystancja termiczna  $R_{th}$  czujnika zależy od prędkości przepływu  $\vartheta$  otaczającego go medium (rys. 1), np. powietrza, stwarza to możliwość realizacji nowych układów przetworników przepływu typu Hot-Wire, bazujących na estymacji termicznej stałej czasowej czujnika [17] lub na koncepcji przetwornika przepływu w częstotliwość impulsów z termicznym sprzężeniem zwrotnym [18].

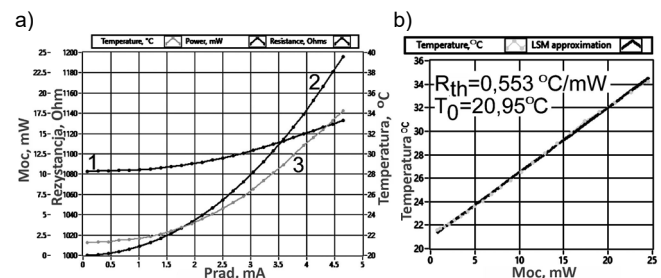
### Układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego do wyznaczania in situ rezystancji termicznej rezystancyjnych czujników temperatury przedstawiono na rysunku 3. Zastosowano układ ratiometryczny z czteropunktowym połączeniem badanego czujnika  $R_{sens}$  i rezystorem odniesienia  $R_N$  po stronie niskiego potencjału [19]. Do linearyzacji charakterystyki czujnika wykorzystano bezpośrednią metodę matematyczną [20]. Przedstawiony układ jest zmodyfikowaną wersją wcześniej opracowanego układu do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych dwójników pasywnych [21]. Podstawowym elementem układu jest moduł pomiarowy z przetwornikami: analogowo-cyfrowym i cyfrowo-analogowym, który dobrano pod kątem zapewnienia możliwie małych niepewności pomiarowych [22]. Ostatecznie zastosowano moduł National Instruments USB-6341 zawierający 16-bitowe przetworniki ADC i DAC zapewniające niepewność pomiarową napięcia 2,19 mV na zakresie 10 V [23]. Przetwornik cyfrowo-analogowy DAC steruje wejściem wzmacniacza mocy PA, z którego wyjścia zasilane są szeregowo połączone: badany czujnik o rezystancji  $R_{sens}$  i rezystor wzorcowy  $R_N$ . W przetworniku analogowo-cyfrowym ADC wykorzystano dwa spośród dostępnych 8 kanałów pracujących w trybie różnicowym.



Rys.3. Układ pomiarowy do wyznaczaniu in situ rezystancji termicznej rezystancyjnych czujników temperatury

W kanale ai2 mierzony jest spadek napięcia  $U_X$  na rezystancji  $R_{sens}$  badanego czujnika, a w kanale ai3 mierzony jest spadek napięcia  $U_N$  na rezystorze wzorcowym  $R_N$ . Oprogramowanie sterujące pomiarami i opracowujące wyniki przygotowano w środowisku LabVIEW [24]. Jest to rozszerzona wersja wcześniej opracowanego programu [21]. Pomiary są realizowane w pętli dla narastających wartości napięcia zadawanego z przetwornika DAC. Zakres zadawanych wartości napięcia oraz wartość zastosowanego rezystora wzorcowego  $R_N$  ustalają zakres wartości prądu pomiarowego  $I_{sens}$  badanego czujnika. Po ustawieniu każdej kolejnej wartości napięcia odczytany jest zadeklarowany czas opóźnienia w pętli na ustalenie się stanu cieplnego czujnika, po czym wykonywane są pomiary napięcia  $U_X$  na rezystancji czujnika  $R_{sens}$  i napięcia  $U_N$  na rezystorze wzorcowym  $R_N$ . Każdy pomiar napięcia  $U_X$ ,  $U_N$  powtarzany jest 100 razy i do dalszych obliczeń brana jest wartość średnia. Następnie, korzystając z prawa Ohma, obliczane są: prąd pomiarowy czujnika  $I_{sens}$  i rezystancja czujnika  $R_{sens}$  oraz moc grzewcza  $P_{el}$ . Temperatura czujnika  $T_{sens}$  obliczana jest z funkcji odwrotnej do charakterystyki czujnika [20]. Na podstawie tych obliczeń tworzone są pierwsze wykresy przedstawione na rysunku 4a. Na drugim wykresie (rys. 4b) prezentowana jest zależność temperatury czujnika  $T_{sens}$  od mocy grzewczej  $P_{el}$ , aproksymowana następnie linią prostą  $y=ax+b$  metodą najmniejszych kwadratów. Ze współczynników linii prostej wyznaczana jest rezystancja termiczna czujnika  $R_{th}=a$  oraz temperatura otoczenia  $T_{amb}=b$  (3). Uzyskane wykresy program zapisuje do plików w postaci graficznej, a wyniki liczbowe zapisywane są w tabeli do pliku tekstowego.



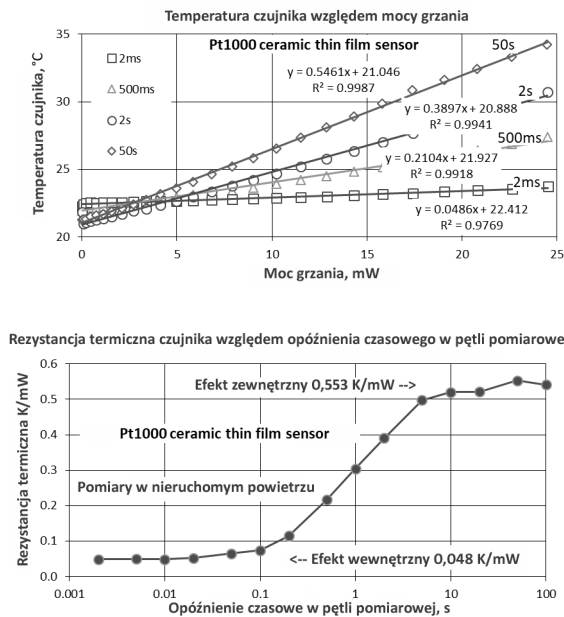
Rys.4. Przykładowe wykresy z wynikami pomiarów: a) rezystancja (1), moc (2) i temperatura (3) w funkcji prądu, b) temperatura czujnika w funkcji mocy grzewczej aproksymowana linią prostą

### Przykładowe wyniki pomiarów

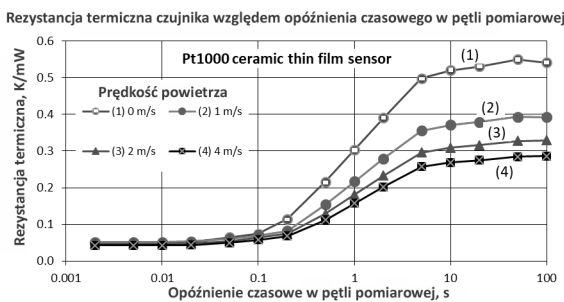
Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane dla cienkowarstwowego czujnika platynowego Pt1000 na podłożu w postaci płytki ceramicznej 2 mm x 5 mm. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki kilku pomiarów w nieruchomym powietrzu dla różnych czasów opóźnienia pomiarów po ustawieniu wartości prądu. Jak widać, otrzymano różne wartości rezystancji termicznej, od 0,0486 °C/mW dla czasu 2 ms do 0,5461 °C/mW dla czasu 50 s. Na rysunku 6 zestawiono na jednym wykresie wyniki pomiarów rezystancji termicznej  $R_{th}$  Rys.5. Temperatura czujnika w funkcji mocy grzewczej dla różnych czasów opóźnienia pomiaru po ustawieniu nowej wartości prądu

otrzymane dla czasów od 2 ms do 100 s. Dla czasów krótszych od 100 ms rezystancja termiczna zmienia się niewiele wokół wartości 0,048 °C/mW, reprezentującej wewnętrzny efekt samonagrzewania. Dla czasów dłuższych od 10 s zmiany są niewielkie wokół wartości 0,553 °C/mW, odpowiadającej efektowi zewnętrznemu. Na rysunku 7 pokazano wyniki dla różnych prędkości przepływu powietrza, od 0 do 4 m/s. Widać na nim, że efekt wewnętrzny zależy tylko od budowy czujnika, a efekt

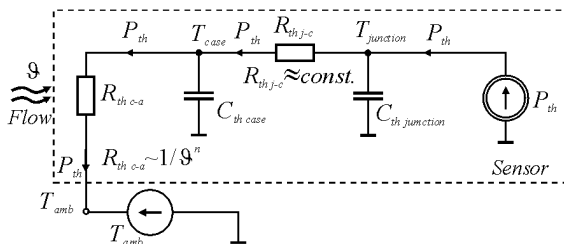
zewnątrzny od warunków otoczenia czujnika. Na rysunku 8 przedstawiono schemat zastępczy czujnika uwzględniający otrzymane wyniki pomiarów i zaobserwowane zależności.



Rys.6. Rezystancja termiczna czujnika wyznaczona dla różnych czasów opóźnienia pomiaru po ustawieniu nowej wartości prądu



Rys.7. Rezystancja termiczna czujnika wyznaczona dla różnych prędkości przepływającego powietrza od 0 do 4 m/s



Rys.8. Schemat zastępczy rezystancyjnego czujnika temperatury uwzględniający stałą rezystancję termiczną wewnętrzną  $R_{th,j-c}$  i zmienną rezystancję termiczną zewnętrzną  $R_{th,c-a}$

### Podsumowanie

Przedstawione w pracy wyniki pomiarów należy traktować jako przykładowe i ograniczone do przebadanych egzemplarzy czujników pracujących w określonych warunkach otoczenia. Uzyskane wartości rezystancji termicznej nie mogą być zastosowane dla innych czujników pracujących w innych warunkach. Zasadniczym rezultatem pracy jest opracowanie metody, układu i aplikacji LabVIEW do eksperymentalnego wyznaczania in situ rezystancji termicznej czujników termorezystancyjnych metalowych (platynowych, niklowych miedzianych) oraz termistorów NTC, PTC i innych obiektów, np.: włókna żarówek wolframowych, czujników termoanemometrycznych itp.

Przedstawione w pracy rozwiązanie umożliwi optymalne dobranie warunków zasilania czujników termorezystancyjnych, zależnie od ich konstrukcji, warunków otoczenia i sposobu montażu czujnika.

**Autor:** dr inż. Eligjusz Pawłowski, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: e.pawlowski@pollub.pl

### LITERATURA

- [1] Guide to the Realization of the ITS-90. Introduction, BIPM (2018)
- [2] Guide to the Realization of the ITS-90. Part 5 - Platinum Resistance Thermometry, BIPM (2021)
- [3] Guide to Secondary Thermometry. Industrial Platinum Resistance Thermometers, BIPM (2021)
- [4] Guide on Secondary Thermometry. Thermistor Thermometry, BIPM (2014)
- [5] Guide on Secondary Thermometry. Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990, BIPM (2021)
- [6] Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors, International Standard IEC 60751:2022, Edition 3.0 (2022)
- [7] Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers. ASTM Standard E1137/E1137M-08 (2020)
- [8] Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers. ASTM Standard E644-11 (2011)
- [9] Brückner J., Measuring resistors and their representation in IEC and ASTM, *Special Hannover Messe*, cnp 2 (2017), 14-16
- [10] Batagelj V. et al, Methods of reducing the uncertainty of the self-heating correction of a standard platinum resistance thermometer in temperature measurements of the highest accuracy, *Meas. Sci. Technol.*, 14 (2003) No. 12, 2151-2158
- [11] Pearce J. V. et al, The optimization of self-heating corrections in resistance thermometry, *Metrologia*, 50 (2013) No. 4, 345-353
- [12] Babita et al, Evaluation of self-heating effect in platinum resistance thermometers, *Measurement*, 203 (2022) 111994
- [13] Li K. R. et al, Reducing the uncertainty of self-heating in high-accuracy cryogenic temperature measurements, *Physics Procedia*, 67 (2015), 1157-1163
- [14] Dinu C., Neagu M., Self-heating effect research for a SPRT measuring the triple point of water, *U.P.B. Sci. Bull., Series A*, 76 (2014) No. 2, 243-250
- [15] Sestan D. et al, Experimental Method for Determination of Self-Heating at the Point of Measurement, *Int J Thermophys*, 38 (2017) art.132, 1-11
- [16] Boyko O., Hotra O., Improvement of dynamic characteristics of thermoresistive transducers with controlled heating, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 95 (2019) No. 5, 110-113
- [17] Pawłowski E., Single Sensor Hot-Wire Anemometer Based on Thermal Time Constant Estimation, *2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE), Warsaw, Poland*, (2018), 1-4
- [18] Pawłowski E., Design and evaluation of a flow-to-frequency converter circuit with thermal feedback, *Meas. Sci. Technol.*, 28 (2017) 054004, 1-9
- [19] A Basic Guide to RTD Measurements, *Application Note SBAA275A, Texas Instruments*, (2023)
- [20] RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC8xx MicroConverter, *AN-709 Analog Devices Application Note*, (2004)
- [21] Otomański P, Pawłowski E. and Szlachta A., Application of LabVIEW to Determine Characteristics of Two-Terminal Passive Components, *2023 14th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia*, (2023), 305-308
- [22] Pawłowski E., Szlachta A., Otomański P., The Influence of Noise Level on the Value of Uncertainty in a Measurement System Containing an Analog-to-Digital Converter, *Energies*, 16 (2023) No. 3:1060, 1-19
- [23] USB-6341, 16 AI (16-Bit, 500 kS/s), 2 AO (900 kS/s), 24 DIO USB Multifunction I/O Device, *Specifications 377879A-01, National Instruments*, (2019)
- [24] Sokoloff L., Applications In LabVIEW, Pearson Prentice Hall, (2004)