

**Anna SZMYRKA-GRZEBYK, Aleksandra KOWAL, Leszek LIPIŃSKI**  
POLSKA AKADEMIA NAUK, INSTYTUT NISKICH TEMPERATUR I BADAŃ STRUKTURALNYCH

## Metody wzorcowania czujników platynowych termometrów rezystancyjnych

Doc. dr hab. Anna SZMYRKA-GRZEBYK

Kierownik Laboratorium Wzorca Temperatury w INTiBS PAN, opiekun państwowego wzorca jednostki miary temperatury w zakresie od 13,8033 K do 273,16 K. Specjalista w zakresie termometrii niskotemperaturowej. Kierownik licznych projektów badawczych finansowanych przez MNiSW, a także projektów finansowanych przez Unię Europejską.



e-mail: A.Szmyrka@int.pan.wroc.pl

Mgr inż. Aleksandra KOWAL

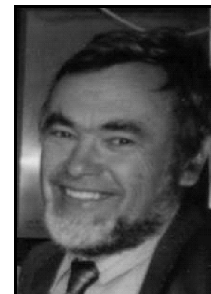
fizyk w Laboratorium Wzorca Temperatury Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Studia na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej ukończyła w 2000 r. Kierownik ds. Jakości w Laboratorium Wzorca Temperatury.



e-mail: A.Kowal@int.pan.wroc.pl

Dr Leszek LIPIŃSKI

Specjalista w Laboratorium Wzorca Temperatury w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Ukończył studia na Wydziale Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Wrocławskiego. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskał w INT i BS PAN. Jest autorem projektów aparatury kriogenicznej i układów do regulacji temperatury stosowanych w Instytucie.



e-mail: L.Lipinski@int.pan.wroc.pl

### Streszczenie

Czujniki platynowe termometrów rezystancyjnych wzorcowane są w punktach stałych skali temperatury, gdy wymagana jest duża dokładność pomiaru – rzędu ułamka milikelwina. Wówczas wzorcuje się termometry przy dwóch wartościach prądu pomiarowego. W przypadku przemysłowych termometrów platynowych wzorcowanie odbywa się przez porównanie ze wskazaniami termometru kontrolnego. W pracy omówiono wpływ prądu pomiarowego na dokładność wzorcowania termometru. Jeżeli wymagana niepewność nie przekracza 1 mK rezystancyjne termometry platynowe można wzorcować tylko przy prądzie 1 mA.

**Słowa kluczowe:** termometry platynowe, skala temperatury, punkty stałe skali temperatury.

### Platinum resistance thermometer calibration methods

#### Abstract

Platinum resistance thermometers are basic sensors used for temperature measurement in the very wide temperature range - from about  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$  up to almost  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Different methods of thermometer calibration are used depending on a desired temperature range and accuracy of measurement. Highest accuracy thermometers (standard platinum resistance thermometers, SPRT) used for the interpolation of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) [1], are calibrated in defined fixed points of the temperature scale (Table 1). Temperature values are calculated from the function  $W(T_{90})$ , which is equal to a ratio of the thermometer resistance  $R(T_{90})$  at the temperature  $T_{90}$  to the resistance  $R(273,16\text{ K})$  at the water triple point. The dependence is described by the equation (1). Thermometers are calibrated at two measuring currents:  $I = 1\text{ mA}$  i  $I = \sqrt{2}\text{ mA}$ , and next the resistance value is extrapolated to the zero current (Fig 1). Many users of SPRTs measure the resistance for  $I = 1\text{ mA}$  only in order to reduce a measuring time. In this paper results of comparison between an measurement accuracy for one and two measuring currents are presented. It was shown that if a needed uncertainty of measurements is higher than 1 mK the thermometers can be calibrated for  $I = 1\text{ mA}$  only. Industrial platinum thermometers are calibrated by the reference to a control calibrated thermometer. The temperature characteristics are described by the Callendar (7) or Callendar – van Dusen (8) equations.

**Keywords:** platinum thermometers, temperature scale, fixed points of temperature scale.

## 1. Wprowadzenie

Czujniki platynowe termometrów rezystancyjnych stanowią podstawową grupę termometrów stosowanych do pomiaru temperatury w bardzo szerokim zakresie jej zmian poczynając od niskich temperatur, około  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , do wysokich temperatur bliskich  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . W zależności od zakresu temperatur i wymaganej dokładności pomiaru stosuje się termometry platynowe różnej konstrukcji i wzorcuje się je wykorzystując różne metody kalibracji. W przypadku termometrów najwyższej dokładności – wzorcowych platynowych termometrów rezystancyjnych (Standard Platinum Resistance Thermometer – SPRT) – interpolacyjnych termometrów obowiązującej Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. (MST-90) [1], kiedy wymagana jest niepewność pomiaru rzędu ułamka milikelwina, wzorcowanie przeprowadza się w definicyjnych punktach stałych skali. Termometry o niższej dokładności wzorcowane są metodą porównawczą; temperaturę wzorcowania wyznacza się za pomocą innego kontrolnego termometru platynowego o znanej charakterystyce rezystancja-temperatura. Metoda porównawcza jest powszechnie stosowana do wzorcowania znormalizowanych czujników platynowych przemysłowych termometrów rezystancyjnych (PN-EN 60751+A2:1997) [2].

W niniejszej pracy skoncentrowano się przede wszystkim na metodzie wzorcowania termometrów platynowych najwyższej dokładności w punktach stałych skali z uwagi na fakt, że jest to metoda mniej znana i rzadziej stosowana przez laboratoria wzorcujące, natomiast metoda porównawcza omówiona jest w sposób skrótowy.

## 2. Wzorcowanie w punktach stałych skali

Międzynarodowa Skala Temperatury z 1990 r. definiuje kilkanaście punktów stałych, którym przypisane są precyzyjnie wyznaczone wartości temperatury (tabela 1) oraz podaje równania interpolacyjne opisujące charakterystykę temperaturową czujników platynowych termometrów rezystancyjnych wzorcowanych w tych punktach. Czujniki stosowane do realizacji skali muszą być wykonane z odpowiednio czystej platyny, której czystość określona jest stosunkiem rezystancji w podanych punktach stałych. Nie można zastosować jednego czujnika platynowego w całym definicyjnym zakresie temperatur. W niskich temperaturach do punktu potrójnego wody stosuje się czujnik o małych wymiarach – typu kapsułkowego. W najszerszym i najbardziej istotnym zakresie temperatur – od punktu potrójnego argonu do punktu krzepnięcia glinu – skala definiowana jest przez czujnik platynowy termometru rezystancyjnego „z długą nóżką”. Nominalna wartość rezystancji tych czujników wynosi  $25\ \Omega$ . W najwyższym zakresie temperatur stosuje się czujnik o wartości rezystancji  $0,25\ \Omega$ .

Tab. 1. Definicyjne punkty stałe Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r  
Tab. 1. Defining fixed points of the International Temperature Scale of 1990

Punkt stały MST-90	Temperatura $T_{90}$ , K	Temperatura $t_{90}$ , °C
Punkt potrójny wodoru	13,8033	-259,3467
Punkt potrójny neonu	24,5561	-248,5939
Punkt potrójny tlenu	54,3584	-218,7916
Punkt potrójny argonu	83,8056	-189,3442
Punkt potrójny rtęci	234,3156	-38,8344
Punkt potrójny wody	273,16	0,01
Punkt topnienia galu	302,9146	29,7646
Punkt krzepnięcia indu	429,7485	156,5985
Punkt krzepnięcia cyny	505,078	231,928
Punkt krzepnięcia cynku	692,677	419,527
Punkt krzepnięcia glinu	933,473	660,323
Punkt krzepnięcia srebra	1234,93	961,78
Punkt krzepnięcia złota	1337,33	1064,18
Punkt krzepnięcia miedzi	1357,77	1084,62

Wartości temperatury w MST-90 wyznaczane są ze stosunku rezystancji  $R(T_{90})$  termometru w temperaturze  $T_{90}$  do rezystancji  $R(273,16 \text{ K})$  w punkcie potrójnym wody. Stosunek ten określa wartość funkcji:

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16 \text{ K}). \quad (1)$$

W poszczególnych zakresach wzorcowania termometru wartość temperatury  $T_{90}$  otrzymuje się przez wyznaczenie funkcji odchylenia  $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ , gdzie  $W_r(T_{90})$  jest funkcją odniesienia, dla której stałe równania są stabilizowane w MST-90. W definicyjnych punktach stałych odchylenie wyznacza się bezpośrednio na podstawie wzorcowania, a w temperaturach pośrednich za pomocą funkcji odchylenia podanej w MST-90.

W zakresie niskich temperatur, od punktu potrójnego wodoru o temperaturze 13,8033 K do punktu potrójnego wody 273,16 K, wzorcowy rezystancyjny termometr platynowy typu kapsułkowego wzorcowany jest w 6 punktach stałych i dwóch temperaturach zbliżonych do 17 K i 20,3 K. Funkcja odniesienia w tak szerokim zakresie ma postać:

$$\ln W_r(T_{90}) = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[ \frac{\ln(T_{90}/273,16\text{K}) + 1,5}{1,5} \right]^i. \quad (2)$$

W praktyce termometry te wzorcowane są najczęściej w węższym zakresie temperatur od punktu potrójnego argonu 83,8058 K do punktu potrójnego wody. Wtedy funkcja odchylenia upraszcza się do równania:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (3)$$

W zakresie wyższych temperatur, od 0°C (273,16 K) do punktu krzepnięcia srebra, termometry platynowe wzorcowane są w punktach: potrójnym wody, krzepnięcia cyny 231,928°C, cynku 419,527°C, glinu 660,323°C i srebra 961,78°C, gdzie funkcja odchylenia jest następująca:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660,323^\circ\text{C})]^2. \quad (4)$$

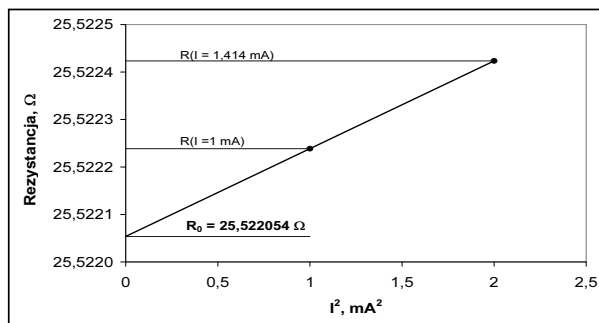
W przypadku stosowania termometru w węższym, najbardziej typowym zakresie temperatur od 0°C do około 160°C termometr wymaga wzorcowania tylko w dwóch punktach stałych, to jest w punkcie potrójnym wody i punkcie krzepnięcia indu o temperaturze 156,5985°C, a funkcja odchylenia opisana jest prostym równaniem:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1]. \quad (5)$$

Wyrażanie wartości temperatury  $T_{90}$  poprzez wyznaczenie funkcji  $W(T_{90})$  a nie wprost zależności  $T=f(R)$  związane jest z obserwowanym eksperymentalnie dryfem rezystancji czujników platynowych w czasie. Dryf ten szacowany jest na około 0,1 mΩ/rok w przypadku czujników o nominalnej wartości 25 Ω i uwzględniany jest jako składowa niepewności wzorcowania w budżecie niepewności. W znacznie mniejszym stopniu niż  $R$  zmienia się w czasie wartość stosunku rezystancji, czyli funkcja  $W(T_{90})$ .

### 3. Wpływ prądu pomiarowego na charakterystykę termometru

Jednym z istotnych czynników decydującym o dokładności wzorcowania termometru, a za tym o dokładności pomiaru temperatury, jest wartość prądu pomiarowego stosowanego dla wyznaczenia rezystancji termometru w punkcie stałym. Prąd przepływający przez czujnik powoduje wydzielanie się ciepła, które zmienia temperaturę samego czujnika – jest to tzw. efekt samonagrzewania się termometrów (*self-heating effect*), a więc zafałszowuje wartość temperatury badanego obiektu. Typowa wartość prądu pomiarowego w trakcie wzorcowania termometru platynowego wynosi 1 mA, prąd ten powoduje przegrzanie się wzorcowych czujników platynowych termometrów rezystancyjnych od około 0,1 mK w niskich temperaturach do około 4 mK w temperaturach wysokich.



Rys. 1. Zależność rezystancji termometru platynowego od prądu pomiarowego  
Fig. 1. Dependence of platinum thermometer resistance on measuring current

W celu zminimalizowania wpływu prądu pomiarowego na dokładność wzorcowania termometru platynowego rekomenduje się pomiar jego rezystancji przy dwóch wartościach prądu:  $I$  oraz  $I\sqrt{2}$ , co pozwala na wyznaczenie rezystancji przy zerowym prądzie pomiarowym. Rezystancja jest liniową funkcją kwadratu natężenia prądu pomiarowego – jak pokazano na rys. 1, a więc różnica rezystancji  $\Delta R$  przy podanych wartościach prądu wynosi:

$$\Delta R = R_{I=\sqrt{2} \text{ mA}} - R_{I=1 \text{ mA}} = R_{I=1 \text{ mA}} - R_{I=0 \text{ mA}} \quad (6)$$

Zależność ta pozwala na wyznaczenie rezystancji dla zerowego prądu pomiarowego.

Konieczność wzorcowania termometrów przy dwóch wartościach prądu znacznie wydłuża czas pomiaru, dlatego niektóre laboratoria wzorczą termometry platynowe metodą punktów stałych stosując tylko jedną wartość prądu  $I = 1 \text{ mA}$ . Taka metoda wzorcowania jest też chętnie akceptowana przez wielu użytkowników termometrów, bo umożliwia dokonywanie pomiarów rezystancji termometru (a w konsekwencji temperatury) tylko dla jednego prądu, co ma praktyczne znaczenie, gdyż nie wszystkie mostki do pomiaru rezystancji termometrów pozwalają na stosowanie innej wartości prądu pomiarowego niż 1 mA.

#### 4. Porównania charakterystyk termometru

W Laboratorium Wzorca Temperatury INTiBS PAN dokonano porównania dokładności pomiaru temperatury i opisu charakterystyki temperaturowej wzorcowych czujników platynowych termometrów rezystancyjnych równaniami MST-90, gdy wartości rezystancji wyznaczone były dla prądu zredukowanego do zerowej wartości i dla  $I = 1\text{ mA}$ . Porównania wyników z pięciu cykli pomiarowych przeprowadzono w zakresie temperatur od punktu potrójnego wody do punktu krzepnięcia indu. W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji termometru platynowego firmy Hart nr 4113 w punkcie potrójnym wody i punkcie krzepnięcia indu, a także wartości funkcji  $W(I_n)$  wyznaczone z równania MST-90 dla rezystancji termometru zmierzonej przy prądzie  $I = 1\text{ mA}$  i zredukowanej do zerowej wartości prądu pomiarowego. Policzono wartość różnicy  $\Delta W$  i wynikającą z niej różnicę temperatury  $\Delta T$ . Różnice wartości funkcji  $W(I_n)$  wyznaczone dla  $I = 1\text{ mA}$  i  $I = 0\text{ mA}$  wynosiły od 0,000 000 12 do 0,000 009 co odpowiada różnicy temperatury od 0,03 mK do 0,22 mK.

Tab. 2. Wyniki pomiarów rezystancji termometru platynowego Hart nr 4113  
Tab. 2. Measurement results of the Hart no 4113 platinum resistance thermometer

$R(\text{H}_2\text{O}), \Omega$	$R(I_n), \Omega$	$W(I_n)$
$I=1\text{mA}$		
25,209662	40,574899	1,6094979
25,209675	40,574997	1,6095010
25,209665	40,574906	1,6094980
25,209674	40,574924	1,6094981
25,209676	40,575018	1,6095017
$I=0\text{mA}$		
25,209504	40,574649	1,6094981
25,209517	40,574766	1,6095019
25,209507	40,574666	1,6094986
25,209517	40,574687	1,6094988
25,209521	40,574670	1,60950185

Oczywiste jest, że różnice wartości rezystancji przy dwóch różnych prądach pomiarowych są wyraźne. W punkcie potrójnym wody wynoszą one około 0,15 m $\Omega$ , co odpowiada różnicy wartości temperatury około 1,5 mK, a w punkcie krzepnięcia indu są, jak należy oczekiwać, większe i wynoszą około 0,25 m $\Omega$  (2,5 mK). Z analizy danych zawartych w tabeli 2 wynika natomiast, że w przypadku wzorcowania termometrów platynowych przy jednej wartości prądu pomiarowego  $I = 1\text{ mA}$  różnice wartości funkcji  $W(T_{90})$  skutkują zmianą wartości temperatury na poziomie ułamka milikelwina w porównaniu do wartości wyznaczonej dla zerowego prądu. W wielu przypadkach jest to wartość do pominięcia.

W celu zweryfikowania uzyskanych wyników wykonano dodatkowo wzorcowanie termometru w punkcie topnienia galu o temperaturze 29,7646°C i porównano wartości rezystancji termometru uzyskanej w bezpośrednim pomiarze i wyznaczonej z równania skali dla  $I = 1\text{ mA}$  i  $I = 0\text{ mA}$ . W żadnym przypadku różnica wyznaczonych wartości temperatury  $\Delta T$  nie przekraczała 0,2 mK. Uzyskane rezultaty przedstawiono w tabeli 3.

Przedstawione rezultaty dowodzą, że w przypadku, gdy wymagana dokładność wzorcowania czujnika platynowego termometru rezystancyjnego nie przekracza 1 mK można wykonywać jego wzorcowanie przy jednej wartości prądu pomiarowego, np.  $I = 1\text{ mA}$  i do opisu ich charakterystyki temperaturowej stosować równania skali MST-90. Jednak zarówno przy opracowywaniu świadectwa wzorcowania jak i w trakcie posługiwania się wzorcowanym termometrem należy zwrócić uwagę w jakich warunkach termometr był wzorcowany. Informacja taka musi być podana na świadectwie wzorcowania.

Tab. 3. Wyniki pomiarów i obliczeń rezystancji termometru platynowego Hart nr 4113 w punkcie topnienia galu

Tab. 3. Measured and calculated resistance values of the Hart no 4113 platinum thermometer at the melting point of galium

Rezystancja zmierzona $R, \Omega$	Rezystancja wyznaczona $R, \Omega$	$\Delta R, \Omega$	$\Delta T, \text{mK}$
dla $I = 1\text{ mA}$			
28,186417	28,186417	0,000000	0
28,186418	28,186414	-0,000004	-0,036
28,186425	28,186423	-0,000002	-0,028
28,186422	28,186438	0,000016	0,161
28,186426	28,186443	0,000017	0,174
dla $I = 0\text{ mA}$			
28,186245	28,186240	-0,000005	-0,059
28,186246	28,186243	-0,000003	-0,032
28,186249	28,186250	0,000001	0,013
28,186251	28,186266	0,000015	0,155
28,186252	28,186269	0,000017	0,174

Podane wyżej wyniki odnoszą się do czujników platynowych termometrów rezystancyjnych najwyższej dokładności – tych, określanych jako *standard thermometer*, w których przegrzewanie prądem pomiarowym jest niewielkie. W praktyce często stosowane są termometry platynowe o podobnej konstrukcji lecz zakwalifikowane do grupy tzw. *semi-standard*. Na ogół dwa czynniki decydują o niższej kwalifikacji termometru – mniejsza odtwarzalność wskazań i większy efekt przegrzewania się termometru prądem pomiarowym. Przegrzewanie się termometru prądem pomiarowym 1 mA w punkcie potrójnym wody może wynosić kilkadziesiąt milikelwinów, tzn. kilka setnych stopnia Celsjusza. W punktach stałych o wyższej temperaturze jest ono oczywiście jeszcze większe. W przypadku takich termometrów należy rozważyć, czy celowe i uzasadnione jest wzorcowanie ich w punktach stałych, jeśli ma być ono wykonane tylko dla jednej wartości prądu.

W tym miejscu należy też zwrócić uwagę, że efekt przegrzewania termometru prądem pomiarowym silnie zależy od warunków w jakich termometr jest stosowany. Najmniejszy efekt jest w przypadku zanurzenia termometru w przepływającej cieczy, gdy odprowadzanie ciepła od czujnika do otaczającego go medium jest stosunkowo dobre. W rzeczywistych więc warunkach eksploatacji termometru można mieć do czynienia z sytuacją istotnie różną od warunków jego wzorcowania, a tym samym wykonywać pomiary o dużo większą niepewnością niż wynikałoby to z wzorcowania. Błąd ten minimalizuje się właśnie przez pomiar rezystancji przy dwóch wartościach prądu i redukcję wartości rezystancji do zerowego prądu pomiarowego.

#### 5. Wzorcowanie metodą porównawczą

Zdecydowana większość czujników platynowych termometrów rezystancyjnych wzorcowana jest metodą porównawczą w termostatach cieczowych bądź piecach z blokami izotermicznymi, przez porównanie wartości rezystancji wzorcowanego czujnika z rezystancją termometru kontrolnego o znanej charakterystyce temperaturowej. Wzorcowanie metodą porównawczą przeprowadza się przy jednym prądzie pomiarowym – na ogół równym 1 mA. Można też wzorcować termometry przy innych wartościach prądu podanych przez producenta czujników.

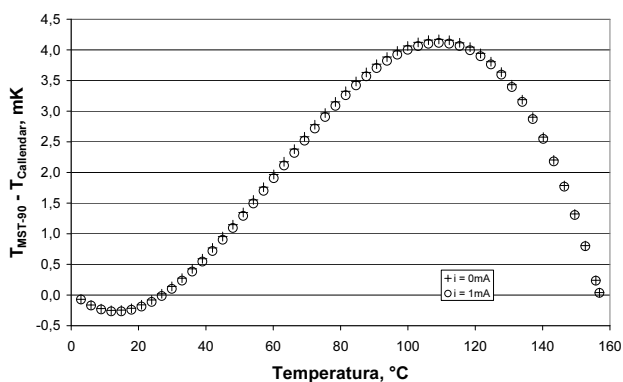
Metodę porównawczą stosuje się do wzorcowania czujników platynowych przemysłowych termometrów rezystancyjnych, co do których wymagania sprecyzowane są w normie PN-EN 60751+A2:1997. Norma dotyczy termometrów o nominalnej wartości rezystancji 100  $\Omega$ , które mogą być stosowane w szerokim zakresie temperatur od -200°C do 850°C. W zakresie temperatur dodatnich, od 0°C wzwyż, charakterystyka termometryczna takich czujników opisana jest równaniem:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (7)$$

opracowanym przez Callendara [3] jeszcze w XIX w. W zakresie niższych temperatur równanie wyrażające zależność między rezystancją a temperaturą zawiera dodatkowy człon wprowadzony przez van Dusenę [3]:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3] \quad (8)$$

Współczynniki obu równań podane są w normie. Takimi samymi równaniami o innych współczynnikach mogą być opisane charakterystyki termometrów platynowych o nominalnej wartości rezystancji 25  $\Omega$ .



Rys. 4. Różnica charakterystyk temperaturowych termometru platynowego Hart nr 4113 opisanych równaniem Callendara i równaniem skali MST-90

Fig. 4. The difference of platinum thermometer characteristics Hart no 4113 expressed by the Callendar equation and MST-90 scale equation

Przeprowadzono porównanie jak opisuje charakterystykę temperaturową czujnika SPRT nr 4113 równanie Callendara i równa-

nie skali MST-90 w zakresie temperatur od punktu potrójnego wody do punktu krzepnięcia indu. Do obliczeń przyjęto wartości rezystancji w punkcie potrójnym wody, topnienia galu i krzepnięcia indu wyznaczone dla  $I = 1 \text{ mA}$  i  $I = 0 \text{ mA}$ . Wyniki przedstawiono na rysunku 4. Wartości temperatury wyznaczone z obu równań różnią się o kilka milikelwinów, natomiast wpływ prądu pomiarowego jest zaniedbywany.

## 6. Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy wynika, że czujniki platynowe termometrów rezystancyjnych mogą być wzorcowane przy jednym prądzie pomiarowym, np.  $I = 1 \text{ mA}$ , a do opisu ich charakterystyk termometrycznych można zastosować odpowiednie równania skali MST-90 bądź znacznie prostsze równania Callendara, jeżeli oczekiwana niepewność pomiaru jest większa niż 1 mK.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2008 – 2010 jako projekt nr KB/58/13484/IT1 realizowany w ramach Przedsięwzięcia Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Inicjatywa technologiczna I”.

## 7. Literatura

- [1] Preston – Thomas H.: The International Temperature Scale of 1990 (ITS – 90), Metrologia 27, 1990, str. 3-10.
- [2] Polska Norma PN-En 60751+A2, grudzień 1997: Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych.
- [3] Nicholas J.V., White D.R.: Traceable temperatures, John Wiley & Sons, Series in Measurement Science and Technology, Chicester, 1994.

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Zapraszamy do prenumeraty czasopisma PAK w 2010 roku

Cena prenumeraty rocznej: 192,00 zł netto/1 egz.

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

**WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530,  
00-050 Warszawa,  
tel./fax: 022 827 25 40

**Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
ul. Akademicka 10, pok. 30b,  
44-100 Gliwice,  
tel./fax: 032 237 19 45,  
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl,  
www.pak.info.pl