

Tomasz BAKOŃ¹, Roman WITKOWSKI², Rafał MALINOWSKI²

¹ SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO, WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI, 02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 164

² INSTYTUT ENERGETYKI INSTYTUT BADAWCZY, LABORATORIUM APARATURY POMIAROWEJ, 02-981 Warszawa, ul. Augustówka 36

Wpływ błędu wyznaczenia odwrotnej charakterystyki termoelektrycznej na niepewność wzorcowania wskaźników i symulatorów współpracujących z czujnikami termoelektrycznymi

Dr inż. Tomasz BAKOŃ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (1999). Doktorat na Wydziale Elektrotechniki i Technik Informatycznych Uniwersytetu Ruhry w Bochum (2008). W latach 2000-2003 i 2009-2011 pracownik Instytutu Energetyki w Warszawie, 2003-2008 Uniwersytetu Ruhry, od 2010 Zakładu Gospodarki Energetycznej SGGW. Zainteresowania: metrologia, odnawialne źródła energii, jakość energii elektrycznej, układy przekaźnikowe.



e-mail: tomasz_bakon@sggw.pl

Mgr inż. Roman WITKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Uczestnik kilkudziesięciu szkoleń specjalistycznych w zakresie oceny systemów zarządzania zgodnych z wymaganiami normy ISO 17025 i ISO 9001. Od 1997 pracuje w Instytucie Energetyki w Warszawie, obecnie jako kierownik Laboratorium Aparatury Pomiarowej. Członek Zarządu Klubu POLLAB. Zainteresowania: systemy pomiarowe, pomiary przemysłowe, wzorcowanie, systemy zarządzania jakością.



e-mail: roman.witkowski@ien.com.pl

Inż. Rafał MALINOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Od 2005 pracuje w Instytucie Energetyki w Warszawie, obecnie jako zastępca kierownika Laboratorium Aparatury Pomiarowej. Zainteresowania: systemy pomiarowe, wzorcowanie, przetwarzanie sygnałów.



e-mail: rafal.malinowski@ien.com.pl

1. Czujniki termoelektryczne

Termoelementy należą obok termorezystorów do najczęściej stosowanych czujników do pomiaru temperatury, ich zakres stosowania przedstawiono w tabeli 1. Właściwości metrologiczne termoelementów ogólnego użytku opisane są przez normy, w Polsce norma PN-EN 60584 [1, 2, 3] określa typy, tolerancje i przewody stosowane dla czujników termoelektrycznych. Czułość termoelementów (współczynnik Seebecka) jest zależna od mierzonej temperatury i nie przekracza 80 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (rys. 1).

Tab. 1. Zakresy pracy najczęściej spotykanych czujników termoelektrycznych
Tab. 1. Operating ranges of frequently used thermocouples

Czujnik	Zakres pracy	Siła termoelektryczna
Czujniki termoelektryczne zgodne z normą [1]		
K NiCr-Ni	-270 °C... 1372 °C	54,9 mV dla 1372 °C
J Fe-CuNi	-210 °C... 1200 °C	69,6 mV dla 1200 °C
T Cu-CuNi	-270 °C... 400 °C	20,9 mV dla 400 °C
E NiCr-CuNi	-270 °C... 1000 °C	76,4 mV dla 1000 °C
N NiCrSi-NiSi	-270 °C... 1300 °C	47,5 mV dla 1300 °C
S Pt10Rh-Pt	-50 °C... 1768 °C	18,7 mV dla 1768 °C
R Pt13Rh-Pt	-50 °C... 1768 °C	21,1 mV dla 1768 °C
B Pt30Rh-Pt6Rh	0 °C... 1820 °C	13,8 mV dla 1820 °C
Najczęściej spotykane czujniki termoelektryczne nieobjęte normą [1]		
C W5Re-W26Re	0 °C... 1900 °C lub* 2320 °C	37,1 mV dla 2320 °C
D (inaczej W) W3Re-W25Re	0 °C... 1900 °C lub* 2320 °C	39,5 mV dla 2320 °C
G W-W26Re	0 °C... 1900 °C lub* 2320 °C	38,6 mV dla 2320 °C
M Ni-Ni18Mo	0 °C... 1410 °C zalecany zakres do 1287 °C	74,1 mV dla 1410 °C
L Fe-CuNi (zgodne z DIN 43710)	-200 °C... 900 °C	53,1 mV dla 900 °C
U Cu-CuNi (zgodne z DIN 43710)	-200 °C... 600 °C	34,3 mV dla 600 °C
Pallapath® Pt5Rh-Au46Pd2Pt	do 1200 °C w powietrzu	55,4 mV dla 1200 °C
Ir-Ir40Rh	do 2000 °C	ok. 10 mV dla 2000 °C
AuFe-Cr	głównie: -270 °C... -200 °C	ok. 4,7 mV dla -270 °C

* – w zależności od atmosfery

Streszczenie

Mierniki i rejestratory bez czujników (wskaźniki) i symulatory temperatury przeznaczone do współpracy z czujnikami termoelektrycznymi wzorcowane są z niepewnościami rozszerzonymi dla $k = 2$ rzędu tysięcznych części kelwina. W laboratoriach akredytowanych wzorcowania takiego dokonuje się na podstawie zaleceń instrukcji EURAMETu [7]. W artykule przedstawiono beziteracyjną metodę eliminacji błędów wyznaczenia odwrotnej charakterystyki termometrycznej znormalizowanych czujników termoelektrycznych.

Słowa kluczowe: temperatura, czujniki termoelektryczne, niepewność pomiaru, wzorcowanie.

Influence of thermoelectric inverse polynomial error on calibration uncertainty of indicators and simulators used with thermocouples

Abstract

The paper presents the influence of thermoelectric inverse characteristics on the calibration uncertainty of measuring instruments used with thermocouples. Calibration methods for temperature indicators and simulators recommended by EURAMET for use in accredited laboratories are described in the guide [7]. Table 1 presents frequently used thermocouples. Equations (1-4) for the standards thermocouples are illustrated in Fig. 1 (the Seebeck coefficient) and Fig. 2 (change of the Seebeck coefficient). The calculation error of inverse polynomials (4) for thermocouples made of noble metals is shown in Fig. 3 and those made of non-noble metals in Fig. 4. Section 4 describes the uncertainty calculation method for calibration of electrical temperature measuring instruments and simulators. In Section 5 the authors describe how to calculate the temperature value from a thermoelectric voltage without using iterative methods in the case of standardized thermocouples.

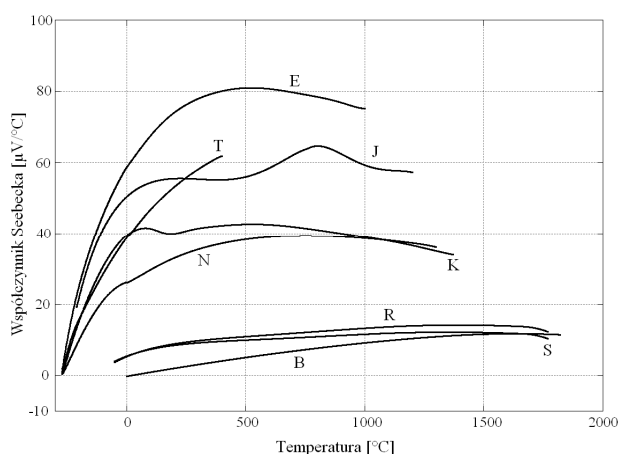
Keywords: temperature, thermocouples, measurement uncertainty, calibration.

Termoelementy produkowane są w 1., 2. i 3. klasie dokładności (typ B – tylko klasy 2. i 3.), błędy dopuszczalne dla najdokładniejszej klasy 1. wynoszą od $\pm 0,5$ °C do 0,4 % wartości mierzonej [2].

Norma [3] rozróżnia przewody kompensacyjne oraz przewody rozszerzające (przedłużeniowe). Przewody rozszerzające zrobione są z tych samych materiałów co termoelektrody i wykonywane są w klasach 1. i 2. Dla klasy 1. posiadają błąd maksymalny $\pm 1,5$ °C, a w klasie 2. $\pm 2,5$ °C. Natomiast przewody kompensacyjne są wykonywane z materiałów tańszych o zbliżonych właściwościach

do termoelektrod, ich błąd dopuszczalny jest większy, produkowane są tylko w klasie dokładności 2. i według normy maksymalny błąd dopuszczalny waha się od $\pm 2,5\text{ }^\circ\text{C}$ do $\pm 5,0\text{ }^\circ\text{C}$ w zależności od typu czujnika i użytego materiału [3]. Zastosowanie przewodu kompensacyjnego z innego materiału niż termoelektroda wprowadza dodatkowe błędy pomiaru – szczególnie dla termoelementów z materiałów szlachetnych (typu S, R i B) o małym nachyleniu charakterystyki – dlatego norma podaje dodatkowo zakres temperatur (na ogół jest to od $-25\text{ }^\circ\text{C}$ do $200\text{ }^\circ\text{C}$) [3], dla których podany przez producenta błąd zostaje zachowany.

W celu zmniejszenia niepewności pomiaru temperatury, zachowania spójności pomiarowej oraz kontroli nad zmianą w czasie właściwości metrologicznych termoelementów i przewodów kompensacyjnych oraz urządzeń współpracujących z nimi (np. wskaźników (mierników, rejestratorów) czy symulatorów) powinno się dokonywać okresowych wzorcowań. Pozwala to na zastosowanie błędów pomiaru wyznaczonych w drodze wzorcowania, których oszacowane niepewności rozszerzone mogą być kilkukrotnie mniejsze od błędów maksymalnych definiowanych przez normy.



Rys. 1. Zależność współczynników Seebecka od temperatury dla termoelementów spełniających wymagania normy [1]

Fig. 1. Dependence of the Seebeck coefficients on the temperature for thermocouples meeting standard requirements [1]

2. Charakterystyki termoelementów

Zależność siły termoelektrycznej od temperatury może być opisywana równaniami o różnej postaci. Najczęściej spotykaną postacią są wielomiany [4]. Norma [1] podaje wartości siły termoelektrycznej E w zależności od temperatury t dla ośmiu najczęściej stosowanych typów termoelementów (porównaj tab. 1). Wartości zawarte w normie zostały wyznaczone na podstawie równań postaci:

$$E = \sum_{i=0}^n c_i \cdot (t_{90})^i + \alpha_0 \cdot e^{\alpha_1(t_{90} + \alpha_2)^2}, \quad (1)$$

(przy czym współczynniki $\alpha_i \neq 0$, ($i = 0, 1, 2$) tylko dla termoelementu typu K w zakresie temperatur powyżej $0\text{ }^\circ\text{C}$); gdzie: c_i – kilka do kilkunastu współczynników zależnych od rodzaju termoelementu i przedziału temperatury, t_{90} – temperatura $^\circ\text{C}$ według skali MST-90.

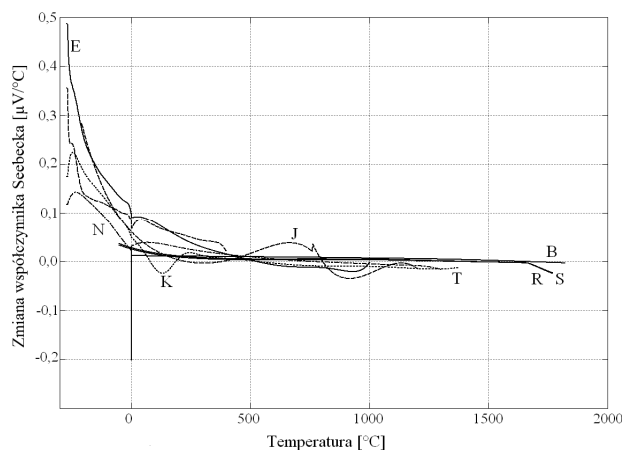
Współczynniki Seebecka (przedstawione na rys. 1) definiuje się jako nachylenie charakterystyki w danym punkcie i dla znormalizowanych według [1] termoelementów określa się wzorem:

$$S = \frac{dE}{dt} = \sum_{i=0}^n i \cdot c_i \cdot (t_{90})^{i-1} + 2 \cdot \alpha_0 \cdot \alpha_1 (t_{90} + \alpha_2) \cdot e^{\alpha_1(t_{90} + \alpha_2)^2}, \quad (2)$$

a zmianę współczynnika Seebecka (rys. 2) jako:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d^2 E}{dt^2} = \sum_{i=0}^n i \cdot (i-1) \cdot c_i \cdot (t_{90})^{i-2} + 2 \cdot \alpha_0 \cdot \alpha_1 (1 + 2 \cdot (t_{90} + \alpha_2)^2) \cdot e^{\alpha_1(t_{90} + \alpha_2)^2} \quad (3)$$

W zmienności drugiej pochodnej można zauważyć również granice przedziałów aproksymacji wielomianami, szczególnie dobrze widoczne dla termoelementu typu N (rys. 2).



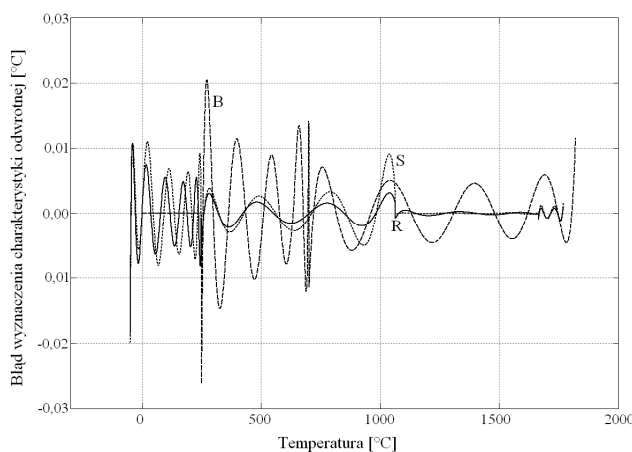
Rys. 2. Zmiana współczynników Seebecka w zależności od temperatury dla termoelementów spełniających wymagania normy [1]

Fig. 2. Change of the Seebeck coefficients depending on the temperature for thermocouples meeting standard requirements [1]

Ze względu na złożoność wzorów (1) i (2) wyznacza się odwrotną charakterystykę termoelektryczną – pozwalającą obliczyć temperaturę odpowiadającą danej sile termoelektrycznej E [mV]. Dla termoelementów znormalizowanych według [1] przybiera ona postać wzorów wielomianowych:

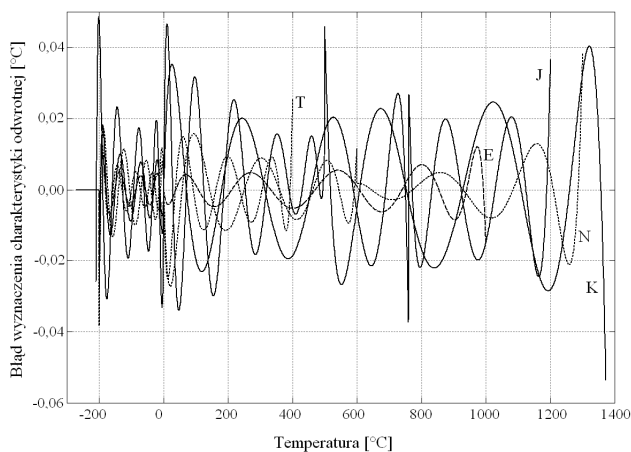
$$t_{90} = \sum_{i=0}^n k_i \cdot E^i, \quad (4)$$

przy czym występujące we wzorze (4) współczynniki k_i są inne i w ogólności w innej liczbie niż c_i we wzorach (1-3), a sam wzór z definicji stanowi tylko przybliżenie odwrotności wzoru (1).



Rys. 3. Błąd określenia charakterystyki odwrotnej dla termoelementów z metali szlachetnych

Fig. 3. Inverse polynomial error for thermocouples made of noble metals



Rys. 4. Błąd określenia charakterystyki odwrotnej dla termoelementów z metali nieszlachetnych

Fig. 4. Inverse polynomial error for thermocouples made of non-noble metals

Dla kilku termoelementów nie zdefiniowano charakterystyk odwrotnych dla niskich temperatur. Norma podając wzory i przedziały ich stosowalności podaje również maksymalne błędy wynikające z ich zastosowania w danym przedziale. Zależność błędów wyznaczenia temperatury na podstawie znormalizowanych charakterystyk odwrotnych przedstawiono dla termoelementów wykonanych z metali szlachetnych na rys. 3, a nieszlachetnych na rys. 4. Dlatego w przypadkach dokładnych pomiarów – jak pokazuje praktyka laboratoryjna [5], szczególnie dla termoelementów z metali nieszlachetnych, dla których przebieg zależności $S(t)$ jest silnie nieliniowy (patrz rys. 1) – należy obliczać siłę termoelektryczną przy pomocy iteracji z zastosowaniem równań (1-3). W przypadku termoelementów, dla których nie określono charakterystyki odwrotnej jest to jedyna możliwość.

3. Wzorcowanie wskaźników i symulatorów temperatury

Wskaźniki (mierniki, rejestratory i inne urządzenia bez czujników) temperatury najlepiej wzorcować wraz z całym torem pomiarowym i współpracującymi z nimi czujnikami termoelektrycznymi. Nie zawsze jest to jednak możliwe, np. ze względu na trwałe przymocowanie czujnika lub częstą konieczność jego wymiany.

Wzorcowanie wskaźników, także rejestratorów, itp. (bez czujników) lub symulatorów temperatury dokonuje się na drodze elektrycznej. Akredytowane metody pomiarowe wymagają zachowania spójności pomiarowej. Ma to miejsce np. wtedy, gdy wzorcowanie wykonano w akredytowanym laboratorium wzorcującym [6].

Wzorcowanie wskaźników temperatury współpracujących z czujnikami termoelektrycznymi oraz symulatorów temperatury służących do generacji napięć odpowiadającym siłom termoelektrycznym termoelementów dokonuje się zgodnie z zaleceniami instrukcji [7]. W przypadku oddzielnego wzorcowania wskaźnika lub symulatora temperatury pojawiają się dodatkowe składowe niepewności wynikające z przeliczenia temperatury na odpowiadającą jej siłę termoelektryczną. Bezpośrednie zastosowanie wzoru (4) wprowadza dodatkowe błędy dochodzące w przypadku termoelementów z metali nieszlachetnych do $0,06\text{ °C}$ (porównaj rys. 3 i 4). Nie jest to wiele przy wzorcowaniu czujników termoelektrycznych np. w piecu, ale podczas wzorcowania wskaźników lub symulatorów temperatury błędy te mogą okazać się znaczące. Dla porównania najlepsze deklarowane przez laboratoria wzorcujące akredytowane w Polskim Centrum Akredytacji zdolności pomiarowe CMC wynoszą nawet $0,005\text{ °C}$ [8].

4. Równanie pomiaru i składowe budżetu niepewności

W celu wyznaczenia składowych budżetu niepewności wzorcowania wskaźnika temperatury współpracującego z czujnikiem termoelektrycznym, należy posłużyć się następującym równaniem pomiaru.

Błąd pomiaru wskaźnika temperatury bez funkcji kompensacji temperatury złącza odniesienia wyznacza się z równania:

$$e_X = t_X + \delta t_{RX} - t_{EMF}(V + \delta V_G + \delta V_R + \delta V_P) \quad (5)$$

w uproszczeniu:

$$e_X \approx t_X + \delta t_{RX} - t_{EMF}(V) - (\delta V_G + \delta V_R + \delta V_P) / S_X \quad (6)$$

Dla wskaźników z kompensacją temperatury złącza odniesienia, zachodzi konieczność użycia przewodu kompensacyjnego. W takim układzie pomiarowym powstają dodatkowe złącza termoelektryczne pomiędzy obwodem generatora napięcia, a przewodem kompensacyjnym. Wpływ tych złączeń należy skompensować. Dobrym rozwiązaniem jest umieszczenie powstałych złączeń w temperaturze topnienia lodu. Praktycznie realizacja polega najczęściej na użyciu mieszaniny pokruszonego lodu i wody destylowanej, co umożliwia odtworzenie temperatury 0 °C z niepewnością nie gorszą niż 10 mK . Użyty przewód kompensacyjny ma bezpośredni wpływ na wyniki wzorcowania. Musi on być dobrze zdefiniowany, a napięcie w obwodzie pomiarowym należy skorygować o ewentualne błędy wynikające z odchylenia charakterystyki użytego przewodu [9].

Błąd pomiaru dla wskaźnika temperatury z funkcją kompensacji temperatury złącza odniesienia:

$$e_X = t_X + \delta t_{RX} - t_{EMF}[V + \delta V_G + \delta V_R + \delta V_P + \delta E_K(0^\circ\text{C}, t') - \delta E_{DK}(0^\circ\text{C}, t') - \delta \alpha_0 S_0] \quad (7)$$

lub w uproszczeniu:

$$e_X \approx t_X + \delta t_{RX} - t_{EMF}(V) - [\delta V_G + \delta V_R + \delta V_P + \delta E_K(0^\circ\text{C}, t') - \delta E_{DK}(0^\circ\text{C}, t') - \delta \alpha_0 S_0] / S_X \quad (8)$$

gdzie: t_X – średnia arytmetyczna wskazań wzorcowanego wskaźnika temperatury; δt_{RX} – poprawka związana z ograniczoną rozdzielczością wzorcowanego wskaźnika temperatury; t_{EMF} – wartość temperatury otrzymana w wyniku zastosowania odwrotnej charakterystyki termometrycznej, metoda opisana w [7] nie precyzuje w jaki sposób powinno to zostać obliczone, problem zostanie dokładniej opisany w punkcie 5; V – wartość napięcia wzorca pomiarowego roboczego - generowanego przez generator lub średnia arytmetyczna wskazań woltomierza wzorcowego; δV_G , δV_R , δV_P – poprawki związane z dodatkowymi czynnikami wpływającymi na wskazania wzorca (np.: warunkami pracy, dryfem); z ograniczoną rozdzielczością wzorca oraz z nieskompensowanymi napięciami pasożytniczymi w układzie pomiarowym; S_0 , S_X – współczynniki Seebecka znormalizowanego termoelementu w temperaturze 0 °C i punkcie wzorcowania, δt_0 – poprawka związana z odchyleniem temperatury złącza odniesienia od 0 °C ; $\delta E_K(0\text{ °C}, t')$ – odchylenie przewodu kompensacyjnego od wartości znormalizowanej dla temperatury t' z przedziału $(20 \div 35)\text{ °C}$; $\delta E_{DK}(0\text{ °C}, t')$ – poprawka związana z dryfem przewodów kompensacyjnych.

Równanie złożonej niepewności pomiaru dla układu bez funkcji kompensacji temperatury złącza odniesienia przybiera postać:

$$u^2(e_X) \approx u^2(t_X) + u^2(\delta t_{RX}) + u^2(t_{EMF}(V)) + c_1^2 u^2(\delta V_G) + c_1^2 u^2(\delta V_R) + c_1^2 u^2(\delta V_P) \quad (9)$$

oraz w przypadku zastosowania kompensacji:

$$u^2(e_X) \approx u^2(t_X) + u^2(\delta t_{RX}) + u^2(t_{EMF}(V)) + c_1^2 u^2(\delta V_G) + c_1^2 u^2(\delta V_R) + c_1^2 u^2(\delta V_P) + c_1^2 u^2(\delta E_K(0^\circ C, t')) + c_1^2 u^2(\delta E_{DK}(0^\circ C, t')) + c_{01}^2 u^2(\delta t_0) \quad (10)$$

gdzie współczynniki wrażliwości wyznacza się ze wzorów:

$$c_1 = \frac{1}{S_X} \quad \text{oraz} \quad c_{01} = \frac{S_0}{S_X}.$$

W przypadku symulatorów temperatury postępuje się w sposób analogiczny podstawiając jako t_X zamiast średniej wartości wskaźnika temperatury wartość nastawy wzorcowanego symulatora.

Jak wynika ze wzorów (5-8) wartość temperatury wyznaczona na podstawie odwrotnej charakterystyki termometrycznej ma bezpośredni wpływ na błąd pomiaru wyznaczony podczas wzorcowania. Ze wzorów (9) i (10) wynika również zależność niepewności wzorcowania od wyznaczenia temperatury na podstawie zmierzonej siły termoelektrycznej, ponieważ współczynniki wrażliwości c_1 i c_{01} są zależne od temperatury (rys. 1).

5. Wyznaczenie temperatury t_{EMF}

Niepewność wyznaczenia temperatury $u[t_{EMF}(V)]$ odpowiadającej sile termoelektrycznej zmierzonej przez woltomierz wzorcowy składa się z dwóch podstawowych czynników:

– z niepewności $u[t_{EMF_{Arhm}}(V)]$ średniej arytmetycznej wskazań woltomierza wyrażoną w stopniach Celsjusza, wyznaczonej na podstawie odchylenia eksperymentalnego średniej i współczynnika Seebecka na podstawie wzoru:

$$u[t_{EMF_{Arhm}}(V)] = c_1 \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (V_{(k)} - V)^2} \quad (11)$$

gdzie: $V_{(k)}$ – pojedyncze wskazanie woltomierza

– oraz z niepewności standardowej wnoszonej przez dokładność metody wyznaczenia charakterystyki odwrotnej $u[t(V)]$:

$$u^2(t_{EMF}) = u^2(t_{EMF_{Arhm}}) + u^2[t(V)] \quad (12)$$

Wyznaczania charakterystyki odwrotnej dla termoelementów zgodnych z normą [1] można wykonać za pomocą wzoru (4). Wzór ten w stosunku do wzoru (1) zwraca wartości temperatury różniące się o nie więcej niż maksymalne błędy dopuszczalne podane w normie (nie więcej niż o 0,06 °C). Błąd aproksymacji za pomocą wzoru (4) można obliczyć na podstawie zależności:

$$\delta t_{90} = t_{90} - \sum_{i=0}^n k_i \cdot \left[\sum_{i=0}^n c_i \cdot (t_{90})^i + \alpha_0 \cdot e^{\alpha_1(t_{90} + \alpha_2)^2} \right]^i \quad (13)$$

Różnice wynikające z niedokładności aproksymacji obliczone na podstawie wzoru (13) przedstawiono dla termoelementów z metali szlachetnych na rys. 3 oraz z metali nieszlachetnych na rys. 4.

Zastosowanie poprawki δt_{90} w celu eliminacji błędu spowodowanego aproksymacją pozwala oszacować niepewność $u[t(V)]$ na poziomie dokładności obliczeń numerycznych i uznać ją jako pomijalnie małą w porównaniu z innymi składowymi niepewnościami:

$$u[t(V)] \rightarrow 0. \quad (14)$$

Dodatkowo należy skorygować jeszcze współczynnik Seebecka użyty do obliczeń błędu pomiaru oraz niepewności pomiaru w równaniach przedstawionych w punkcie 4.

Można tego dokonać obliczając nową wartość współczynnika Seebecka dla skorygowanej wartości temperatury:

$$t_{90K} = t_{90} + \delta t_{90} \quad (15)$$

lub, ponieważ zmiana współczynnika Seebecka w zależności od temperatury wynosi nie więcej niż 0,5 $\mu V/^\circ C$, a dla temperatur powyżej 0 °C nie więcej niż 0,1 $\mu V/^\circ C$ (porównaj rys. 2), można przyjąć, że:

$$\frac{dS(t_{90})}{dt} \approx \frac{dS(t_{90K})}{dt} \quad (16)$$

i obliczyć nową wartość współczynnika Seebecka na podstawie znajomości jego pochodnej zgodnie z zależnością:

$$S(t_{90K}) = S(t_{90}) + \frac{dS(t_{90})}{dt} \cdot \delta t_{90} = S(t_{90}) + \frac{d^2 E(t_{90})}{dt^2} \cdot \delta t_{90} \quad (17)$$

6. Wnioski

Coraz dokładniejsze wskaźniki i symulatory temperatury przeznaczone do współpracy z czujnikami termoelektrycznymi wymagają wzorcowania z niepewnościami lepszymi niż maksymalne błędy dopuszczalne wyznaczenia charakterystyk odwrotnych zawarte w normie [1]. Aby sprostać rosnącym wymaganiom konieczne stało się opracowanie innych metod wyznaczenia charakterystyk odwrotnych wraz z określeniem ich niepewności. Zastosowanie komputerowych systemów pomiarowych powoduje, że obliczenia te mogą być dokonywane w czasie rzeczywistym.

W punkcie 5 zaprezentowano beziteracyjną metodę pozwalającą na uzyskanie błędu wyznaczenia odwrotnej charakterystyki termometrycznej na poziomie błędów obliczeń numerycznych. Metoda ta ma zastosowanie dla znormalizowanych termoelementów o określonych charakterystykach odwrotnych. Stosowanie metod beziteracyjnych jest szczególnie przydatne przy korzystaniu z arkuszy kalkulacyjnych.

7. Literatura

- [1] PN-EN 60584-1:1997, Termoelementy – Charakterystyki.
- [2] PN-EN 60584-2:1997, Termoelementy – Tolerancje.
- [3] PN-EN 60584-3:2008, Termoelementy – Kable rozszerzające i kompensacyjne – Tolerancje i systemy rozpoznawcze.
- [4] Segall A.: Solution for the correction of temperature measurements based on beaded thermocouples, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (2001), pp. 2801-2808.
- [5] Witkowski R., Bakoń T., Szydlik A.: Wzorcowanie aparatury do pomiaru wielkości elektrycznych, temperatury i ciśnienia w akredytowanym Laboratorium Aparatury Pomiarowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka z. 98 nr 886/2001, str. 447-456.
- [6] Lisowski M., Mazurkiewicz Ł.: Akredytacja laboratorium wzorcowania przyrządów pomiarowych. Pomiar Automatyka Kontrola, vol. 57, nr 03/2011, str. 287-290.
- [7] Przewodnik EURAMET/cg-11/v.01 Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement, 2007.
- [8] Polskie Centrum Akredytacji, Wykaz laboratoriów wzorcowujących akredytowanych w oparciu o normę PN-EN ISO/IEC 17025, www.pca.gov.pl
- [9] Bakoń T.: Wpływ przewodów kompensacyjnych i spoiny odniesienia na poprawność wskazań przyrządów współpracujących z czujnikami termoelektrycznymi. elektro.info 03/2013, ss. 72-77.