

Wpływ gradientu temperatury na niepewność pomiaru w procesie wzorcowania termometrów szklanych cieczowych i elektrycznych

Impact of temperature gradient on measurement uncertainty in the calibration process of liquid glass and electric thermometers

Helena Bodzek

Okręgowy Urząd Miar w Bydgoszczy

Artykuł przybliży zagadnienie badania gradientu temperatury w termostatach i w komorach klimatycznych oraz jego wpływ na niepewność pomiaru. Na podstawie badań przeprowadzonych w termostacie Julabo F12, wykonanych w Laboratorium Długości i Termometrii OUM w Bydgoszczy, opracowano analizę uzyskania optymalnych warunków pomiaru, pozwalających na utrzymanie wymaganego poziomu CMC w laboratorium.

The article presents the problem of studying temperature gradient in thermostats and climatic chambers and their impact on measurement uncertainty. Based on the tests of gradients in the Julabo F12 thermostat, carried out at the Length and Thermometry Laboratory of the Regional Office of Measures in Bydgoszcz, an analysis of obtaining optimal measurement conditions allowing to maintain the required level of CMC in the laboratory was developed.

Słowa kluczowe: gradient temperatury, niepewność pomiaru, termometry

Keywords: temperature gradient, measurement uncertainty, thermometers

Wprowadzenie

Termometry należą do przyrządów mających szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia codziennego. Wykorzystywane są w licznych instytucjach i przedsiębiorstwach, w których kontrola temperatury jest podstawą prawidłowego przebiegu realizowanych procesów. Wymagania temperaturowe dla procesów produkcji, przechowywania i użytkowania różnych wyrobów są często ściśle określone i dlatego muszą być regularnie monitorowane. Dotyczy to zarówno pomiarów temperatury konkretnych ciał i substancji, jak również pomiarów warunków środowiskowych w pomieszczeniach, magazynach, halach produkcyjnych, chłodniach itp. Powszechność użytkowania termometrów oraz konieczność regularnego sprawdzania ich działania przyczynia się do dużego zainteresowania usługą wzorcowania termometrów szklanych cieczowych i elektrycznych.

Każdy pomiar realizowany w procesie wzorcowania jest obarczony niepewnością pomiaru, która wynika z braku pełnej znajomości wartości wielkości mierzonej. W celu przedstawienia kompletnego wyniku pomiaru należy wcześniej określić, jakie czynniki mogą wpłynąć na różnice między wartością zmierzoną a wartością rzeczywistą. Te czynniki są źródłami niepewności pomiaru. Podstawowymi jej składowymi są te wynikające z konstrukcji lub budowy samych przyrządów pomiarowych. W przypadku wzorcowania termometrów metodą porównawczą dotyczy to zarówno termometrów wzorcowych, jak i wzorcowanych. Pozostałe składowe mogą wynikać np. z wpływu personelu przeprowadzającego wzorcowanie, jak ma to miejsce przy odczytywaniu wartości temperatury w termometrach szklanych z działką elementarną.

W pomiarach temperatury jednym ze znaczących czynników jest jej gradient, spowodowany zmiennym rozłożeniem temperatury w przestrzeni pomiarowej.

Zakres pracy laboratorium

Pomiary temperatury w Okręgowym Urzędzie Miar w Bydgoszczy wykonywane są w Laboratorium Długości i Termometrii. W 2006 roku laboratorium uzyskało akredytację PCA w dziedzinie termometrii i od tego czasu wzorcuje termometry elektryczne z czujnikami oraz termometry szklane cieczowe metodą porównawczą w termostatach, w zakresie od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $360\text{ }^{\circ}\text{C}$. W roku 2019 laboratorium poszerzyło swoje kompetencje i uzyskało akredytację na wzorcowanie przyrządów elektronicznych do pomiaru temperatury powietrza i wilgotności względnej w komorze klimatycznej.

Z racji wieloletniego doświadczenia nabytego przy realizacji dużej liczby wzorcowań, na bazie Laboratorium Długości i Termometrii OUM w Bydgoszczy, w 2019 roku zostało utworzone Centrum kompetencyjne w dziedzinie termometrii. Przyczynia się ono do jeszcze większego zaangażowania w rozwój laboratorium w tej dziedzinie. W celu poszerzenia zakresu pracy i rozbudowy laboratorium został wprowadzony do użytkowania nowy termostat Fluke 7381 (rys. 1), który pracuje w zakresie temperatur od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. W planach laboratorium jest uzyskanie akredytacji w zakresie wzorcowania termometrów w ujemnych temperaturach do $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pozwoli to odpowiedzieć na potrzeby klientów, którzy pracują w tych zakresach temperatur i wymagają sprawdzenia swojego wyposażenia pomiarowego.



Rys. 1. Termostat Fluke 7381

Metoda wzorcowania termometrów

Termometry szklane cieczowe i elektryczne w Laboratorium Długości i Termometrii wzorcowane są metodą porównawczą. Metoda polega na porównaniu wartości zmierzonej przez przyrząd wzorcowany z wartością temperatury odniesienia, która wyznaczona jest przy pomocy przyrządu wzorcowego z uwzględnieniem jego poprawki ze świadectwa wzorcowania. Obydwa termometry zanurza się w studni termostatu, która jest wypełniona określonym medium, np. wodą destylowaną, alkoholem lub olejem. Analogicznie wygląda wzorcowanie termometrów do pomiaru temperatury powietrza w komorze klimatycznej. Termometry wzorcowane i termometr wzorcowy umieszczone są w przestrzeni pomiarowej komory. Zarówno termostaty, jak i komora, skonstruowane są w taki sposób, aby uzyskać zadaną temperaturę, a następnie utrzymać jej stabilizację. Na pojawiające się różnice wartości temperatury w całej przestrzeni pomiarowej wpływa wiele czynników. Wielkość gradientu temperatury zależy od rodzaju urządzenia. Jego konstrukcja i zastosowane rozwiązania techniczne determinują zdolność do utrzymania stabilnej temperatury i wyrównanych warunków w całej jego przestrzeni pomiarowej. Parametry te mogą ulegać zmianom z upływającym czasem i intensywnością eksploatacji urządzenia. Dlatego, w celu rzetelnego przeprowadzenia wzorcowania, należy wyznaczyć różnice w wartościach temperatury i regularnie powtarzać przeprowadzane badania jej gradientów.

Gradient temperatury jako składowa niepewności pomiaru

Gradient temperatury w rozpatrywanej przestrzeni pomiarowej można zdefiniować jako zmianę wartości temperatury w zależności od odległości. W praktyce wzorcowania w termostatach i komorze klimatycznej należy wyznaczyć maksymalną różnicę temperatury, która występuje w tej przestrzeni. W czasie badania wyznacza się gradient:

- poziomy Δt_{poz} – przedstawiający różnice temperatur przy tej samej głębokości zanurzenia czujników,
- pionowy Δt_{pion} – przedstawiający różnice temperatur przy różnej głębokości zanurzenia czujników.

Niepewności standardowe spowodowane tymi gradientami temperatury są wyznaczane metodą typu B, przy założeniu równomiernego (prostokątnego) rozkładu prawdopodobieństwa:

$$u(\delta t_{\text{poz}}) = \frac{\Delta t_{\text{poz}}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$u(\delta t_{\text{pion}}) = \frac{\Delta t_{\text{pion}}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Zakładając równomierność rozkładu temperatur w całej przestrzeni pomiarowej uzasadnione jest przyjęcie, że niepewność standardowa związana z wypadkowym gradientem temperatury spełnia równanie:

$$u^2(\delta t) = u^2(\delta t_{\text{poz}}) + u^2(\delta t_{\text{pion}}) \quad (3)$$

Ponieważ wielkość δt związana z gradientem temperatury jest jedną z dominujących składowych w budżecie niepewności, dlatego przeprowadzono badania tych gradientów.

Badania gradientów temperatury dla termostatu przenośnego Julabo F12

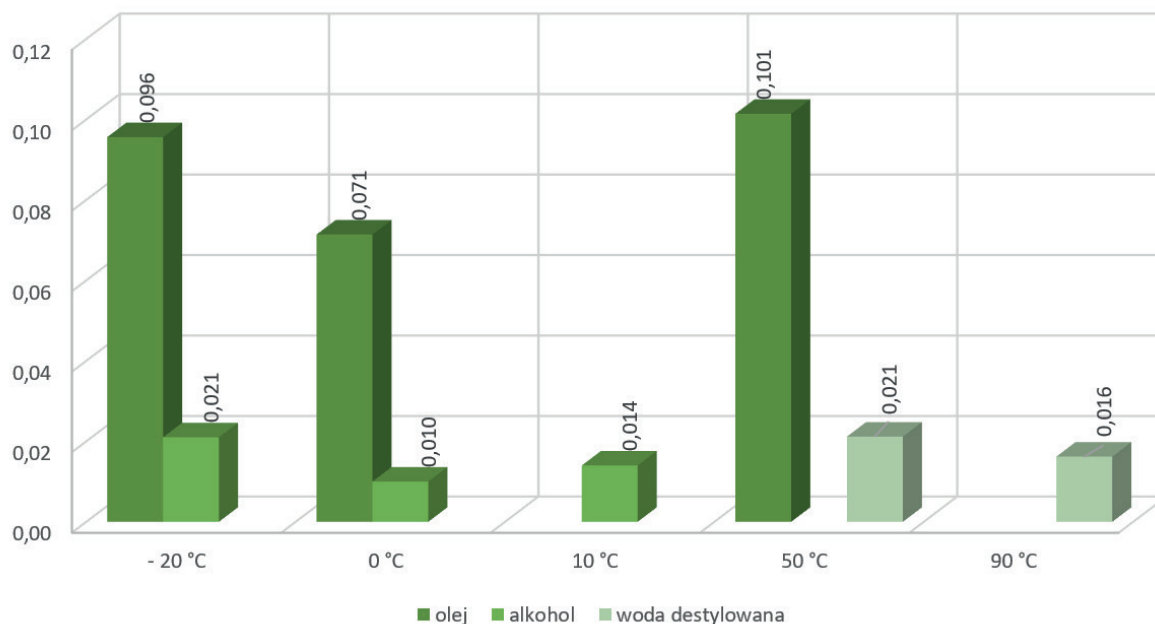
W 2020 roku przeprowadzono pełne badania gradientów temperatury dla termostatu przenośnego Julabo F12 (rys. 2), w celu włączenia go do wzorcowania w zakresie akredytacji PCA. Wielką zaletą tego termostatu są jego kompaktowe gabaryty, z czego wynika również

jego mobilność. Pozwala to na stosowanie termostatu poza siedzibą laboratorium. Wzorcowanie niektórych termometrów wymaga, aby odbywało się ono w miejscu zamontowania przyrządów. Wynika to często z konstrukcji przyrządów i braku możliwości odłączenia ich od reszty aparatury.

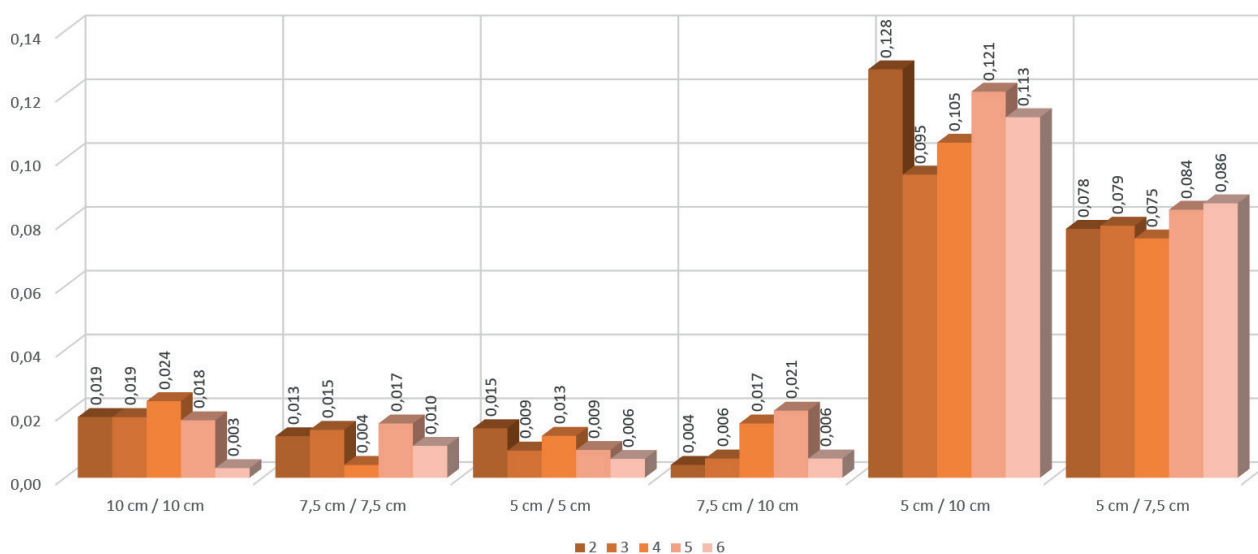
Badania gradientów temperatury przeprowadzane były na podstawie dokumentu określającego kryteria zapewniające jakość wzorcowań (KZJ/LW1/03), który doprecyzowuje sposób i częstość ich przeprowadzania oraz ostateczne kryteria oceny wyników ww. badań. Polegały one na wyznaczeniu gradientów poziomych i pionowych przy użyciu różnych mediów dla temperatur: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dla temperatury $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ wyznaczono gradient w oleju i alkoholu. Dla temperatury $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ w czasie badania użyto oleju i wody destylowanej. Gradienty dla temperatury $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ badano w alkoholu, natomiast dla $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ w wodzie destylowanej. Do badań wykorzystano termometr



■ Rys. 2. Termostat przenośny Julabo F12



Rys. 3. Maksymalne wartości gradientów wyznaczone dla różnych temperatur, zależnie od zastosowanego medium, przy zanurzeniu czujników na głębokości 7,5 cm i 10 cm

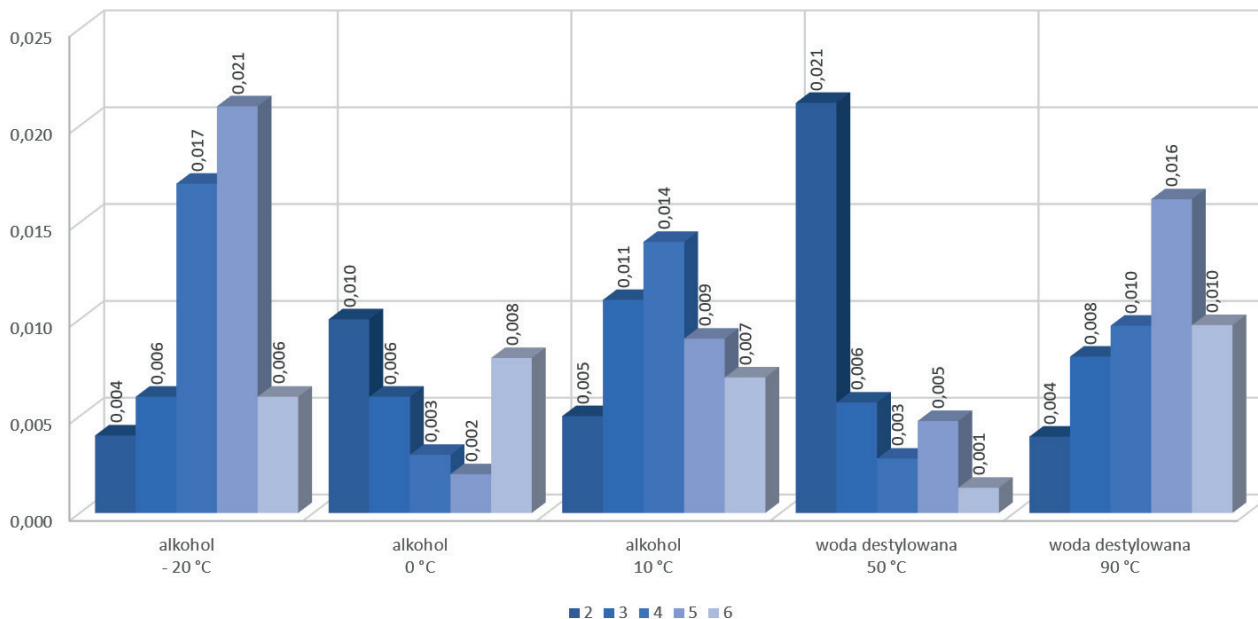


Rys. 4. Maksymalne wartości gradientów wyznaczone dla alkoholu w temperaturze -20 °C w zależności od głębokości zanurzenia czujników i umiejscowienia drugiego czujnika (numery 2-6 określają umiejscowienie drugiego czujnika w studni)

elektryczny Fluke 1524 z dwoma czujnikami typu 5615. W celu wyznaczenia maksymalnej wartości gradientu poziomego czujniki zanurzone na głębokości 5 cm, 7,5 cm i 10 cm, licząc od górnej granicy medium. Gradient pionowy badano przy głębokościach 5 cm i 7,5 cm, 7,5 cm i 10 cm oraz 5 cm i 10 cm. Czujniki zanurzane były w sześciu otworach umiejscowionych na planie okręgu, w którym pierwszy czujnik zanurzony był w pierwszym otworze na stałe, a drugi czujnik ustawiono w kolejnych otworach oznaczonych numerami od 2 do 6.

W trakcie badań zaobserwowano wyraźne różnice w stabilizacji i wartości maksymalnego gradientu, zależnie od wykorzystanego medium. Na rys. 3 porównano wyniki pomiarów dla różnych temperatur, zależnie od zastosowanego medium, przy zanurzeniu czujników na głębokości 7,5 cm i 10 cm.

W temperaturze 0 °C i temperaturach ujemnych alkohol okazał się dużo lepszym medium od oleju. Stabilizacja w oleju była gorsza, a różnice w wartościach temperatury, w różnych miejscach studni, wyraźnie wyższe. Prawdopodobną przyczyną takiej sytuacji była



Rys. 5. Maksymalne wartości gradientu wyznaczonego dla wszystkich badanych temperatur w zależności od umiejscowienia drugiego czujnika (zanurzenie czujników na głębokości 7,5 cm i 10 cm)

większa lepkość oleju oraz określona konstrukcja mieszadeł w termostacie. Podobnie sytuacja przedstawia się dla wyższych temperatur. Porównano gradienty dla oleju i wody destylowanej w temperaturze 50 °C. Woda destylowana cechowała się dobrą stabilizacją, a wartości gradientów były kilkakrotnie mniejsze niż w przypadku oleju. Wyniki kolejnych pomiarów, wykonanych przy innych głębokościach zanurzenia czujników, przedstawiały analogiczną sytuację, co pozwala wysnuć wniosek, że w termostacie przy wzorcowaniu należy używać alkoholu dla temperatur niższych i wody destylowanej dla temperatur wyższych.

W trakcie badań zaobserwowano ponadto, że przy niskich temperaturach należy umieszczać czujniki w dolnej części studni pomiarowej. Jak przedstawiono na rys. 4, przy głębszym zanurzeniu czujników, wartości gradientu nie przekraczały 0,025 °C. Natomiast przy płytkim zanurzeniu jednego z czujników, na głębokość 5 cm, wyraźnie wzrastały wartości wyznaczonych gradientów. Jedynym wyjątkiem było zanurzenie czujników na tej samej głębokości 5 cm. W tej sytuacji wartości gradientów również były zadowalające. W dodatknych temperaturach, przy badaniu gradientów dla wody destylowanej, nie zaobserwowano tak znacznych różnic w zależności od zanurzenia czujników. Maksymalny gradient temperatury w 50 °C i 90 °C wynosił 0,03 °C.

Nie zaobserwowano również istotnych różnic w wartościach gradientów temperatury, zależnie od umiejscowienia drugiego czujnika w kolejnych miejscach studni.

Gradienty w różnych temperaturach dla alkoholu i wody destylowanej przyjmowały zbliżone wartości nie przekraczające 0,03 °C. Na rys. 5 przedstawione zostały maksymalne wartości gradientów, wyznaczone dla każdego ułożenia czujników, przy zanurzeniu pierwszego czujnika na głębokość 7,5 cm oraz drugiego na głębokość 10 cm (w kolejnych badanych miejscach oznaczonych numerami 2-6).

Podsumowanie

W pracy wskazano na istotny wpływ składowej związanej z gradientem temperatury w przestrzeni pomiarowej na niepewność przy wzorcowaniu termometrów szklanych i elektronicznych metodą porównawczą. Wysoki udział tej składowej wynika z konstrukcji urządzenia, a w przypadku termostatów również z zastosowanego medium.

Z powyższych rozważań wynika, że w celu wykonywania rzetelnych pomiarów należy przeprowadzić badania, pozwalające poznać możliwości danego urządzenia i wyznaczyć maksymalny gradient temperatury, który występuje w czasie jego pracy. Przeprowadzenie badań gradientów temperatury pozwala na dogłębne poznanie specyfikacji działania urządzenia, co wydaje się konieczne do użytkowania go jako wyposażenia pomiarowego przy przeprowadzaniu wzorcowania, zwłaszcza w zakresie akredytacji.

Wzorcowanie termometrów jest dziedziną niezwykle ważną w każdym obszarze gospodarki. Obecnie ta dziedzina metrologii wydaje się jeszcze bardziej istotna.

Przykładowo instytucje związane z ochroną zdrowia, jak np. szpitale, laboratoria i stacje sanitarno-epidemiologiczne, sprawują kontrole nad swoim wyposażeniem i korzystają z usług akredytowanych laboratoriów. Dlatego w procesie wzorcowania przyrządów do pomiaru temperatury konieczna jest jak najwyższa staranność i rzetelność, co staje się priorytetem w działalności laboratorium.

Bibliografia

- [1] Wyznaczanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. EA-4/02 M:2013.
- [2] IW/LW1/07 Instrukcja wzorcowania. Termometry elektryczne OUM Bydgoszcz, wyd. 19.
- [3] IN/LW1/07 Instrukcja szacowania niepewności pomiaru. Termometry elektryczne OUM Bydgoszcz, wyd. 21.



Helena Bodzek

Absolwentka Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, kierunek fizyka techniczna, specjalność miernictwo komputerowe z informatyką. Pracuje w Okręgowym Urzędzie Miar w Bydgoszczy w Laboratorium Długości i Termometrii. Na co dzień zajmuje się wzorcowaniem przyrządów do pomiarów temperatury i wilgotności względnej.