

Krzysztof FLAKIEWICZ
GŁÓWNY URZĄD MIAR

Charakterystyki metrologiczne wzorcowego generatora temperatury punktu rosy DPG-1

Mgr Krzysztof FLAKIEWICZ

Absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w 1971 r. Kierownik Laboratorium Wilgotności Zakładu Fizykochemii w Głównym Urzędzie Miar.



e-mail: humidity.KF@gum.gov.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono krótki opis budowy i zasady działania wzorca odniesienia jednostki wilgotności powietrza - generatora temperatury punktu rosy DPG-1. Przeznaczony jest on do wzorcowania wzorcowych higrometrów punktu rosy z chłodzonym lustrem w zakresie temperatur punktu rosy $(-80 \div +20) ^\circ\text{C}$. W wyniku wzorcowania określane są poprawki do wskazań wzorcowanego higrometru punktu rosy oraz ich niepewność rozszerzona. Przedyskutowane zostały wielkości wejściowe, równanie pomiaru i równanie niepewności. Przedstawiono przykłady budżetów niepewności dla typowych punktów wzorcowania. Nawiązano ponadto do wyników porównań międzynarodowych EUROMET 511 i EUROMET P621, dotyczących wzorców odniesienia jednostki wilgotności powietrza, w których uczestniczyło Laboratorium Wilgotności GUM. Wyniki tych porównań potwierdzają deklarowane możliwości pomiarowe Laboratorium Wilgotności.

Słowa kluczowe: temperatura punktu rosy, generator wzorcowy, wzorcowanie higrometrów

Metrological characteristics of standard dew-point temperature generator DPG-1

Abstract

In the paper is presented brief description of the construction and principle of operation of the humidity primary standard – dew-point temperature generator DPG-1. It is designed for calibration of the standard chilled mirror dew-point hygrometers in the dew-point temperature range $(-80 \div +20) ^\circ\text{C}$. As the result of calibration are determined the corrections for the indications of the dew-point hygrometer being calibrated and the expanded uncertainty of these corrections are estimated as well. Discussed are the input quantities, the equation of measurement and the equation of the uncertainty. The examples of the uncertainty budgets for the typical points of calibration are presented. Moreover referring to the results of the intercomparison EUROMET 511 and EUROMET P621 concerning primary humidity standards in which the Humidity Laboratory GUM have been participated, the declared capabilities are supported.

Keywords: dew-point temperature, standard generator, calibration of hygrometers

1. Wstęp

Wilgotności powietrza lub gazów jest miarą zawartości pary wodnej w tych mediach. Kiedy będzie mówione w tym artykule o nasyconej parze wodnej, będzie to oznaczało zarówno czystą parę wodną, jak i powietrze lub inny gaz zawierający tę parę, o ile nie zostanie to oddzielnie zaznaczone. Wilgotność określa się za pomocą wielkości takich jak wilgotność bezwzględna (gęstość pary wodnej), temperatura punktu rosy lub ciśnienie cząstkowe pary wodnej. W niektórych zastosowaniach bardziej użyteczne jest posługiwanie się zależnymi od temperatury i ciśnienia wielkościami względnymi, z których najczęściej stosowana jest wilgotność względna. W kwestii wyboru wielkości stosowanych w pomiarach wilgotności nie bez znaczenia jest też fakt, że wiel-

kość prosta pojęciowo jak np. wilgotność bezwzględna, czyli gęstość pary wodnej, nie jest mierzona w sposób bezpośredni i jej określenie może być dokonane na drodze wyliczeń pośrednich z pomiaru innych wielkości lub wyznaczona w wyniku przeprowadzenia procesów laboratoryjnych. Dlatego też największe praktyczne znaczenie mają obecnie trzy metody pomiaru wilgotności, to jest bezpośredni pomiar temperatury punktu rosy z zastosowaniem lustra chłodzonego elementem Peltiera, pośrednie impedancyjne metody pomiaru wilgotności względnej lub temperatury punktu rosy oraz pośrednie metody psychrometryczne. Takie zmiany pociągnęły za sobą konieczność nowego podejścia do spraw wzorcowania i przekazywania jednostki.

2. Spójność pomiarowa w higrometrii

Spśród wielkości stosowanych do określania wilgotności bezpośrednio mierzona jest temperatura punktu rosy. Inne wielkości są mierzone pośrednio lub wyliczane na podstawie pomiaru temperatury punktu rosy, temperatury i ciśnienia. O ile wcześniej układy sprawdzeń nawiązywały do jednostki masy, a na poziomie wzorców podstawowych stosowano metody grawimetryczne, to obecnie rolę tę przejęły wzorce temperatury punktu rosy, które nawiązują do jednostki temperatury.

Z wymienionych wielkości temperatura punktu rosy jest kluczowa dla wilgotności i zapewnienie spójności pomiarowej dla tej wielkości, fundamentalnej także dla wszystkich pozostałych wielkości stosowanych w pomiarach wilgotności, jest podstawowym zadaniem Laboratorium Wilgotności. Natomiast dla temperatury i ciśnienia spójność pomiarowa jest zapewniana poprzez powiązanie z odpowiednimi wzorcami tych jednostek.

Temperatura punktu rosy też jest pewną specyficzną temperaturą i w naturalny sposób jest powiązana z jednostką temperatury, ale wymaga ona właściwego odtworzenia w oparciu o stan nasyconia pary wodnej. W tym aspekcie występuje pewne podobieństwo do odtwarzania skali temperatury na podstawie określonego zbioru punktów stałych. W przypadku skali temperatury mamy do czynienia z komórkami do realizacji punktów stałych, a w przypadku temperatury punktu rosy rolę komórki odgrywa saturator odniesienia.

Temperatura punktu rosy może być odtwarzana zgodnie z definicją w saturatorze odniesienia – naczyniu z nasyconą parą wodną o możliwie najlepszej jednorodności temperaturowej. W idealnej sytuacji temperatura takiego saturatora jest równa temperaturze punktu rosy. Saturator wymaga więc odpowiedniego oprzyrządowania i całe takie stanowisko jest określane jako generator temperatury punktu rosy.

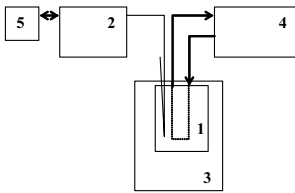
Przedmiotem tej pracy są zagadnienia związane z pomiarami temperatur punktu rosy niższych od temperatury otoczenia, a w szczególności charakterystyki metrologiczne generatora stosowanego jako wzorec podstawowy w tym zakresie. Sam generator bardziej szczegółowo pod względem konstrukcji i działania został przedstawiony w pracy [4].

3. Generator temperatury punktu rosy DPG-1

Generator temperatury punktu rosy DPG-1 jest przeznaczony do wzorcowania higrometrów w temperaturach punktu rosy niższych od temperatury otoczenia. Jego zasadniczym elementem jest precyzyjnie termostatyзовany saturator odniesienia, w którym uzyskujemy nasyconą parę wodną o określonej temperaturze. Pomiar temperatury punktu rosy w higrometrze dokonuje się w głowicy pomiarowej z lustrem chłodzonym elementem Peltiera

do temperatury punktu rosy, mierzonej najczęściej za pomocą precyzyjnego czujnika oporowego. Detekcja pojawiania się rosy jest najczęściej realizowana za pomocą układu optycznego, poprzez pomiar zmiany natężenia wiązki światła odbitego lub rozprzonego na powierzchni lustra, na której pojawia się rosa.

W saturatorze odniesienia (1) powietrze jest nawilżane do stanu nasycenia w temperaturze T_s , mierzonej przez wzorcowy termometr – mostek termometryczny (2) z czujnikiem SPRT (nominalnie 25 omów). Przepływa ono do głowicy pomiarowej wzorcowanego higrometru (4), gdzie następuje detekcja temperatury punktu rosy T_d . Jeżeli temperatura T_s jest niższa od temperatury otoczenia T_a , to dla łatwiejszego uzyskania stanu nasycenia w saturatorze odniesienia, powietrze po detekcji powraca do saturatora. Generator działa wtedy w układzie zamkniętym (na rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu do wzorcowania higrometrów punktu rosy względem generatora temperatury punktu rosy DPG-1:

1 – saturator odniesienia, 2 – termometr wzorcowy z czujnikiem SPRT, 3 – termostat, 4 – wzorcowany higrometr, 5 – opornik wzorcowy

Fig. 1. Scheme of the system for the dew-point hygrometer calibration against the dew-point temperature generator DPG-1:

1 – reference saturator, 2 – standard thermometer with SPRT sensor, 3 – thermostat, 4 – hygrometer to be calibrated, 5 – standard resistor

Ponieważ w generatorze potrzebne jest utrzymywanie określonego przepływu pary wodnej pomiędzy saturatorem odniesienia i głowicą pomiarową higrometru, niezbędne są do tego celu pomocnicze urządzenia takie jak pompka wywołująca ten przepływ oraz przepływomierz - urządzenie do kontroli przepływu pomiędzy saturatorem i głowicą detekcyjną wzorcowanego higrometru. Do tego celu mogą być stosowane wewnętrzne podzespoły higrometru, w które zazwyczaj jest wyposażony przyrząd, lub odpowiednio dobrane niezależne zewnętrzne elementy – pompka i przepływomierz. Istotne jest także usytuowanie tych urządzeń, aby nie wpływały na wynik pomiaru. Z tego powodu nie są one montowane na drodze pomiędzy saturatorem i głowicą pomiarową, lecz na drodze powrotnej od higrometru do saturatora.

4. Charakterystyki metrologiczne generatora DPG-1

W celu określenia charakterystyk generatora potrzebne jest podanie jego zakresu pomiarowego, zbioru wielkości wejściowych, równania pomiaru i niepewności oraz budżetu niepewności i otrzymanych z niego wyników.

W obliczeniach higrometrycznych zasadnicze znaczenia mają zależności ciśnienia nasyconej pary wodnej p_w i p_i od temperatury. Gdy temperatura wyrażana jest w kelwinach (wg skali temperatur ITS 90), a obliczane ciśnienia mają być wyrażane w paskalach, zależności te mają następujące postacie [1]:

(dla wody):

$$\ln p_w(T) = -6096,9385 \cdot T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,433502 \cdot \ln T, \quad (1)$$

(dla lodu):

$$\ln p_i(T) = -6024,5282 \cdot T^{-1} + 29,32707 + 1,0613868 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,3198825 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,49382577 \cdot \ln T, \quad (2)$$

gdzie: T – temperatura wyrażana w kelwinach [K], $p_w(T)$ – ciśnienie nasyconej pary wodnej nad płaską powierzchnią wody w temperaturze T (w paskalach), $p_i(T)$ – ciśnienie nasyconej pary wodnej nad lodem w temperaturze T (w paskalach).

4.1. Zakres pomiarowy

Zakres pomiarowy generatora jest determinowany przez zakres temperatury zastosowanego termostatu. W laboratorium jest stosowany specjalny termostat typu „calibration bath”, wykorzystywany zazwyczaj przy kalibracji termometrów szklanych i oporowych metodą porównania z czujnikiem wzorcowym. Nominalnie dolną granicą jest -80 °C, ale przy dobrze odwodnionym etanolu, stosowanym jako ciecz termostatyczna w temperaturach ujemnych i dobrej izolacji na wylocie komory termostatu, możliwe było schłodzenie kąpieli do około -85 °C.

4.2. Równanie pomiaru

Wzorcowanie higrometru punktu rosy polega na porównaniu temperatury punktu rosy T_{dp} wskazywanej przez sprawdzany przyrząd z temperaturą odniesienia T_{ref} , bliską temperaturze saturatora odniesienia, mierzonej za pomocą wzorcowego termometru lub mostka termometrycznego z czujnikiem oporowym SPRT, z uwzględnieniem poprawki związanej ze spadkiem ciśnienia wzdłuż przewodu łączącego saturator z głowicą pomiarową, spowodowanej przepływem powietrza. W wyniku wzorcowania ustalana jest wartość poprawek ΔT_{dp} dla wskazań sprawdzanego higrometru punktu rosy dla każdej mierzonej wartości temperatury punktu rosy:

$$\Delta T_{dp} = T_{ref} - T_{dp} - \delta T_{dpr} - \delta T_{dps}, \quad (3)$$

gdzie powyższe wielkości odpowiednio oznaczają: T_{ref} – wartość odniesienia (wzorcową) temperatury punktu rosy (estymata wartości poprawnej), T_{dp} – wskazania higrometru wzorcowanego (estymata wartości wskazywanej) oraz wyszczególnione oddzielnie następujące poprawki, pomimo przyjmowania przez nie wartości zerowych (mają udział w niepewności złożonej): δT_{dpr} – poprawka związana z zaokrągleniem, wynikającym z rozdzielczości wskazań higrometru, δT_{dps} – poprawka związana z dryfem wzorcowanego higrometru.

Przy pomiarach z zastosowaniem termometru wzorcowego temperatura odniesienia (wzorcową) punktu rosy T_{ref} wyrażana jest odpowiednio:

$$T_{ref} = T_s + \Delta T_s + \Delta T_p + \delta T_{sr} + \delta T_{ss} + \delta T_{sd} + \delta T_{fs}, \quad (4)$$

co uwzględniając otrzymujemy z (3) wyrażenie na poprawkę wzorcowanego higrometru:

$$\Delta T_{dp} = T_s + \Delta T_s + \Delta T_p + \delta T_{sr} + \delta T_{ss} + \delta T_{sd} + \delta T_{fs} - T_{dp} - \delta T_{dpr} - \delta T_{dps}, \quad (5)$$

gdzie wielkości składowe oznaczają (poprawki ΔT_s i ΔT_p zazwyczaj są niezerowe): T_s – wskazania termometru wzorcowego, ΔT_s – poprawkę dla wskazań termometru wzorcowego określaną przy jego kalibracji, ΔT_p – poprawkę na różnicę ciśnień pomiędzy saturatorem odniesienia i głowicą pomiarową, która z kolei jest wyrażana zależnością:

$$\Delta T_p = \left(\frac{p_s(T_s)}{b_0} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial p_s} \right) \cdot \Delta p, \quad (6)$$

gdzie: $p_s(T_s)$ – ciśnienie pary wodnej nasyconej w temperaturze T_s , b_0 – ciśnienie całkowite w saturatorze odniesienia (tu: w przybli-

zeniu atmosferyczne), $\frac{\partial T_s}{\partial p_s}$ – nachylenie krzywej zależności tem-

peratury punktu rosy od ciśnienia pary wodnej nasyconej w temperaturze T_s , Δp – różnica ciśnień pomiędzy saturatorem i głowicą pomiarową sprawdzanego higrometru. Ciśnienia p_s oraz ich pochodne są obliczane odpowiednio z zależności (1) i (2).

Pozostałe poprawki w wyrażeniach (4) i (5), dla których przyjmujemy przeważnie wartości zerowe (mają udział w niepewności złożonej) oznaczają: δT_{sr} – poprawkę związaną z zaokrągleniem, wynikającym z rozdzielczości wskazań termometru wzorcowego lub mostka, δT_{ss} – poprawkę związaną z dryftem termometru wzorcowego lub mostka, δT_{sd} – poprawkę wynikającą z rozkładu temperatury w saturatorze wzorcowym, δT_{fs} – poprawkę związaną z niepełnym nasyceniem w saturatorze wzorcowym.

W przypadku, gdy zamiast ($T_s + \Delta T_s$) pomiar temperatury saturatora T_w jest wykonywany za pomocą mostka termometrycznego, mierzony jest bezpośrednio k – stosunek oporu wzorcowego R_T czujnika SPRT do opornika wzorcowego R_0 , a temperatura jest wyliczana za pomocą programu utworzonego w arkuszu kalkulacyjnym Excel w oparciu o zależności (2) i (4) podane w [5] i wyniki podane w świadectwach wzorcowania czujnika, mostka i opornika wzorcowego. Oddzielnie analizuje się więcej składowych wpływających na wynik pomiaru temperatury, która jest wyznaczana z zależności:

$$T_w = T(R_T) + \delta T(\Delta R_{T_w}) + \delta T(\Delta R_{T_L}) + \delta T(\Delta R_{T_k}) + \delta T(\Delta R_{T_{R0}}) + \delta T(\Delta R_{T_D}), \quad (7)$$

gdzie uwzględniane są wymienione poniżej wielkości wejściowe, oraz związane z nimi składowe niepewności:

R_T – opór czujnika oporowego SPRT obliczony na podstawie zależności:

$$R_T = k \cdot R_0, \quad (8)$$

gdzie k – zmierzona za pomocą mostka termometrycznego estymata (wartość średnia) serii pomiarów stosunku oporu R_T czujnika do opornika wzorcowego R_0 , a niepewność standardowa u_{RT} – odchylenie standardowe tej średniej, $\delta T(\Delta R_{T_w})$ – poprawka do pomiaru oporu czujnika R_T w punkcie stałym oraz związana z nią niepewność standardowa u_{RT} wzorcowania tego czujnika, która jest określana na podstawie niepewności rozszerzonej podanej w świadectwie dla tego punktu i wyrażona jest w jednostkach temperatury, a dla temperatur pomiędzy punktami stałymi, wyznaczana metodą interpolacji liniowej, $\delta T(\Delta R_{T_L})$ – poprawka związana z odtwarzalnością i nieliniowością charakterystyk czujnika SPRT oraz jej niepewność standardowa u_{TL} , dla której przyjmuje się wyrażony w jednostkach temperatury przedział zmienności $a = \pm 1 \text{ mK}$, a $u^2 = a^2/3$ skąd $u_{TL} = 0,577 \text{ mK}$, $\delta T(\Delta R_{T_k})$ – poprawka wynikająca z pomiaru oporu czujnika R_T , a związana z niepewnością u_k mostka termometrycznego przy określaniu współczynnika „ k ” na podstawie wartości podanych w świadectwie wzorcowania mostka, której udział w niepewności złożonej, wyrażony w jednostkach temperatury u_{T_k} , określany jest z zależności:

$$u_{T_k} = u_k \cdot R_0 \cdot (\partial T / \partial R), \quad (9)$$

$\delta T(\Delta R_{T_{R0}}) = \delta T(k \cdot \Delta R_0)$ – poprawka dla oporu czujnika R_T mierzony za pomocą mostka termometrycznego, związana z niepewnością wzorcowania opornika wzorcowego u_{R0} (podana w świadectwie), jego dryftem i wpływem temperatury ΔR_0 oraz wyrażony w jednostkach temperatury udział w niepewności złożonej u_{TR0} i określany przy zastosowaniu zależności:

$$u_{TR0} = u_{R0} \cdot k \cdot (\partial T / \partial R), \quad (10)$$

$\delta T(\Delta R_{T_D})$ – poprawka dla dryftu oporu czujnika R_T wraz z jego niepewnością standardową u_{TD} szacowaną na podstawie porównania wyników kolejnych wzorcowania.

Po uwzględnieniu tych zależności temperatura odniesienia (wzorcowa) punktu rosy T_{ref} mierzona mostkiem termometrycznym wyrażana jest odpowiednio:

$$T_{ref} = T(R_T) + \delta T(\Delta R_{T_w}) + \delta T(\Delta R_{T_L}) + \delta T(\Delta R_{T_k}) + \delta T(\Delta R_{T_{R0}}) + \delta T(\Delta R_{T_D}) + \Delta T_p + \delta T_{sr} + \delta T_{ss} + \delta T_{sd} + \delta T_{fs}, \quad (11)$$

co uwzględniając otrzymujemy z (3) wyrażenie na poprawkę dla wzorcowanego higrometru:

$$\Delta T_{dp} = T(R_T) + \delta T(\Delta R_{T_w}) + \delta T(\Delta R_{T_L}) + \delta T(\Delta R_{T_k}) + \delta T(\Delta R_{T_{R0}}) + \delta T(\Delta R_{T_D}) + \Delta T_p + \delta T_{sr} + \delta T_{ss} + \delta T_{sd} + \delta T_{fs} - T_{dp} - \delta T_{dpr} - \delta T_{dps}. \quad (12)$$

Ponieważ analityczne postacie zależności $R(T)$ i funkcji odwrotnej $T(R)$ są stosunkowo złożone, wymienione powyżej poprawki wygodniej jest obliczać dla części składowych związanych z wielkościami T_x (x – odpowiednie indeksy dla kolejnych składowych) korzystając z zależności:

$$\delta T(\Delta R_{T_x}) = (\partial T / \partial R) \cdot (\Delta R_{T_x}) = c_T \cdot (\Delta R_{T_x}), \quad (13)$$

gdzie: $c_T = (\partial T / \partial R)$ będzie w budżetach niepewności dla niektórych składowych reprezentować także same współczynniki wrażliwości.

W praktyce wzorcowania, poprawki i niepewności określane są dla kilku wybranych temperatur punktu rosy i one stanowią wielkości bazowe dla poprawek oraz niepewności pomiędzy tymi punktami, gdzie określane są metodą interpolacji liniowej, o ile nie ma przesłanek wskazujących na istotną nieliniowość wewnątrz przyjętego przedziału interpolacji.

4.3. Równanie niepewności pomiaru

W przypadku pomiaru temperatury saturatora T_s termometrem wzorcowym niepewność złożona $u_{c,ATdp}$ wyznaczonej poprawki temperatury punktu rosy jest wyrażana zależnością:

$$u_{c,ATdp} = \sqrt{u_{T_s}^2 + u_{\Delta T_s}^2 + u_{\delta T_{sr}}^2 + u_{\delta T_{ss}}^2 + u_{\delta T_{sd}}^2 + u_{\delta T_{fs}}^2 + u_{\Delta T_p}^2 + u_{T_{dp}}^2 + u_{\delta T_{dpr}}^2 + u_{\delta T_{dps}}^2}, \quad (14)$$

a niepewność złożona oszacowania wartości odniesienia temperatury punktu rosy $u_{T_{ref}}$:

$$u_{T_{ref}} = \sqrt{u_{T_s}^2 + u_{\Delta T_s}^2 + u_{\delta T_{sr}}^2 + u_{\delta T_{ss}}^2 + u_{\delta T_{sd}}^2 + u_{\delta T_{fs}}^2 + u_{\Delta T_p}^2}, \quad (15)$$

gdzie składowe niepewności standardowe odpowiadają: u_{T_s} – niepewność wskazań termometru wzorcowego, $u_{\Delta T_s}$ – niepewność poprawki termometru wzorcowego określona w świadectwie wzorcowania na podstawie podanej niepewności rozszerzonej (przy zastosowaniu mostka będzie to niepewność złożona, określona na podstawie składowych niepewności dla czujnika SPRT, mostka termometrycznego i opornika wzorcowego), $u_{\delta T_{sr}}$ – niepewność związana z zaokrągleniem, wynikającym z rozdzielczości wskazań termometru wzorcowego lub mostka, $u_{\delta T_{ss}}$ – niepewność związana z dryftem termometru wzorcowego lub mostka, $u_{\delta T_{sd}}$ – niepewność oszacowania rozkładu temperatury w saturatorze, $u_{\delta T_{fs}}$ – niepewność związana z niepełnym nasyceniem w saturatorze wzorcowym, $u_{\Delta T_p}$ – niepewność związana z poprawką na różnicę ciśnień pomiędzy saturatorem odniesienia i głowicą pomiarową, $u_{T_{dp}}$ – niepewność wskazań higrometru wzorcowanego, $u_{\delta T_{dpr}}$ – niepewność związana z rozdzielczością higrometru wzorcowanego, $u_{\delta T_{dps}}$ – niepewność związana z dryftem higrometru wzorcowanego.

W przypadku, gdy zamiast $(T_s + \Delta T_s)$ pomiar temperatury saturatora T_w jest wykonywany za pomocą mostka termometrycznego, oddzielnie analizuje się więcej składowych niepewności. Niepewność złożona $u_{c\Delta T_{dp}}$ wyznaczonej poprawki temperatury punktu rosy jest wyrażana zależnością:

$$u_{c\Delta T_{dp}} = \sqrt{u_{RT}^2 + u_{T_w}^2 + u_{T_1}^2 + u_{T_k}^2 + u_{T_{R0}}^2 + u_{T_D}^2 + u_{\delta T_{sr}}^2 + u_{\delta T_{ss}}^2 + u_{\delta T_{sd}}^2 + u_{\delta T_{fs}}^2 + u_{\Delta p}^2 + u_{T_{dp}}^2 + u_{\delta T_{dpr}}^2 + u_{\delta T_{dps}}^2}, \quad (16)$$

gdzie wielkości występujące w powyższej zależności zostały opisane w rozdziałach 4.2 i 4.3.

Przy pomiarach z zastosowaniem mostka termometrycznego otrzymujemy bardziej złożone wyrażenia dla równań pomiarów i niepewności, ale pomiary takie są dokładniejsze. Z tego powodu przy ocenianiu najlepszych zdolności pomiarowych i w przykładowych obliczeniach budżetów niepewności prezentowane są wyniki dla pomiarów mostkowych.

4.4. Budżet niepewności pomiaru

Poniżej podane zostały przykładowe budżety niepewności dla dwóch wybranych temperatur wzorca i przyrządu sprawdzanego dla sytuacji, gdy pomiar temperatury jest wykonywany za pomocą mostka termometrycznego.

Dla rozkładów prostokątnych przyjmowano wartość odchylenia standardowego $u_i = 0,58 a$, gdy przedział zmienności wynosił $\pm a$.

*) – niepewności standardowe podane w świądectwach wyrażone są bezpośrednio w jednostkach temperatury.

Tab. 1. Przykładowe obliczenia budżetów niepewności

Dla $T_w = -79,282 \text{ }^\circ\text{C}$					
Wielkość wejściowa -symbol	Estymata wielkości wejściowej	Niepewność standardowa wielkości wejściowej	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości	Udział w niepewności złożonej [°C]
R_T	17,80089Ω	1,4 E-2 Ω	normalny	9,3 °C/Ω	1,3E-1
ΔR_{T_w}	0	*) 1,8E-3 °C	normalny	*) 1°C/°C	1,8E-3
ΔR_{T_L}	0	*) 5,8E-4 °C	prostokątny	*) 1°C/°C	0,58E-3
ΔR_{T_k}	0	1,1E-5 Ω	normalny	9,3 °C/Ω	1E-4
$\Delta R_{T_{R0}}$	0	4,6E-5 Ω	normalny	9,3 °C/Ω	4,3E-4
ΔR_{T_D}	0	3,1E-4 Ω	prostokątny	9,3 °C/Ω	2,8E-3
δT_{sr}	0	2,9E-6 Ω	prostokątny	9,3 °C/Ω	2,7E-5
δT_{ss}	0	5,8E-4 Ω	prostokątny	9,3 °C/Ω	5,4E-3
δT_{sd}	0	1,2E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	1,2E-3
δT_{fs}	0	1,2E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	1,2E-3
Δp	200 Pa	30Pa	prostokątny	6,1 E-5 °C/Pa	1,8E-3
Dla składowych wielkości dotyczących samego generatora			normalny	Niepewność złożona	$u_c = 0,13$
Dla składowych wielkości dotyczących wzorcowanego higrometru:					
T_{dp}	-78,621 °C	8,6E-2 °C	normalny	1 °C/°C	8,6E-2
δT_{dpr}	0	5,8E-4 °C	prostokątny	1 °C/°C	0,58E-3
δT_{dps}	0	5,8E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	0,58E-2
ΔM_{DP}	- 0,661 °C		normalny	Niepewn. złożona	$u_c = 0,157$
Niepewności rozszerzone. Współczynnik rozszerzenia k=2			normalny	$U =$	0,32

Dla $T_w = 1,072 \text{ }^\circ\text{C}$					
Wielkość wejściowa -symbol	Estymata wielkości wejściowej	Niepewność standardowa wielkości wejściowej	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości	Udział w niepewności złożonej [°C]
R_T	26,2996Ω	1,1 E-3 Ω	normalny	9,6 °C/Ω	1,1E-2
ΔR_{T_w}	0	*) 1,5E-3 °C	normalny	*) 1°C/°C	1,5E-3
ΔR_{T_L}	0	*) 5,8E-4 °C	prostokątny	*) 1°C/°C	0,58E-3
ΔR_{T_k}	0	1,3E-4 Ω	normalny	9,6 °C/Ω	1,2E-3
$\Delta R_{T_{R0}}$	0	2,6E-5 Ω	normalny	9,6 °C/Ω	2,5E-4
ΔR_{T_D}	0	6,1E-5 Ω	prostokątny	9,6 °C/Ω	5,8E-4
δT_{sr}	0	2,9E-6 Ω	prostokątny	9,6 °C/Ω	2,8E-5
δT_{ss}	0	0,58E-3 Ω	prostokątny	9,6 °C/Ω	5,6E-3
δT_{sd}	0	1,2E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	1,2E-3
δT_{fs}	0	1,2E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	1,2E-3
Δp	200 Pa	30Pa	prostokątny	1,4 E-4 °C/Pa	4,2E-3
Dla składowych wielkości dotyczących samego generatora			normalny	Niepewność złożona	$u_c = 0,013$
Dla składowych wielkości dotyczących wzorcowanego higrometru:					
T_{dp}	1,031 °C	1,3E-3 °C	normalny	1 °C/°C	1,3E-3
δT_{dpr}	0	0,58E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	0,58E-3
δT_{dps}	0	0,58E-3 °C	prostokątny	1 °C/°C	0,58E-3
ΔM_{DP}	0,041 °C		normalny	Niepewn. złożona	$u_c = 0,0131$
Niepewności rozszerzone. Współczynnik rozszerzenia k=2			normalny	$U =$	0,027

5. Podsumowanie

Najlepsze możliwości pomiarowe otrzymane na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz obliczeń wykonanych zgodnie z zaprezentowaną metodyką przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Najlepsze możliwości pomiarowe

Temperatura [°C]	-80	-50	0	20
Najlepsza zdolność pomiarowa – niepewność rozszerzona [°C]	0,3	0,1	0,03	0,03

Przedstawione charakterystyki są systematycznie potwierdzane w ramach procedur wdrożonego w laboratorium systemu jakości oraz poprzez udział w międzynarodowych porównaniach EURO-MET 511 (realizacja w latach 1999 – 2001) i porównaniach kluczowych EUROMET P621 (w toku). Wyniki porównań są oceniane zgodnie z kryteriami uzgodnionymi podczas posiedzeń komitetów technicznych EUROMET.

6. Literatura

- [1] Sonntag D., Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae. , Zeitschrift für Metrologie, Vol.40,(5),3. 340-344, 1990.
- [2] A Guide to the Measurement of Humidity, The Institute of Measurement and Control, London 1996.
- [3] Flakiewicz K., Implementation of the dew-point temperature generator as the primary standard in GUM, Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture., Vol 1, UK, 1998.
- [4] Flakiewicz K., Improvement of the primary humidity standard in GUM, Proc. 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMEKO 2001, vol.2, VDE Verlag GMBH, Berlin 2001.
- [5] Zarządzenie nr 15 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 25 września 1998 r. w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o czujnikach termometrów oporowych kontrolnych I i II rzędu (Dz. Urz. Miar I Probiernictwa nr 2, poz. 2).