

ISSN 2080-5632



METROLOGIA

Biuletyn Głównego Urzędu Miar

Nr 3

vol. 6

wrzesień 2011



W bieżącym numerze:

<i>Wizyta kierownictwa GUM w Czeskim Instytucie Metrologicznym (CMI).....</i>	3
<i>Źródła niepewności przy wzorcowaniu wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym – P. Sosinowski</i>	6
<i>Wzorcowanie mierników indukcji pola magnetycznego – K. Falińska</i>	15
<i>Konwencja Metryczna a niepewność pomiaru – P. Fotowicz</i>	21
<i>Monografia Niepewność pomiarów w teorii i praktyce – streszczenia rozdziałów</i>	24
<i>Obchody Światowego Dnia Metrologii w Głównym Urzędzie Miar</i>	45
<i>15. Piknik Naukowy Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik</i>	47

Wizyta kierownictwa GUM w Czeskim Instytucie Metrologicznym (CMI)

W dniu 12 lipca 2011 r. delegacja Głównego Urzędu Miar, w składzie:

- Janina Maria Popowska – Prezes GUM,
- Włodzimierz Popiołek – Wiceprezes GUM,
- Zbigniew Ramotowski – Dyrektor Zakładu Długości i Kąta GUM,

spotkała się w Czeskim Instytucie Metrologicznym w Pradze, z kierownictwem CMI, w składzie:

- Pavel Klenowsky – Dyrektor Generalny CMI,
- Jiri Tesar – Zastępca Dyrektora CMI ds. Podstaw Metrologii.

Celem spotkania było omówienie trybu i zakresu współpracy pomiędzy GUM a CMI oraz zawarcie Porozumienia o Współpracy w Dziedzinie Metrologii.

Dyrektor Z. Ramotowski przedstawił prezentację o propozycjach GUM w odniesieniu do następujących obszarów współpracy metrologicznej:

- Długość:
 - 1) współpraca w zakresie odtwarzania i przekazywania jednostki miary długości za pomocą syntezy częstotliwości optycznych (państwowy wzorzec jednostki miary długości),
 - 2) porównania bilateralne poziomnic elektronicznych,
 - 3) porównania bilateralne dotyczące pomiarów chropowatości powierzchni poprzez pomiar kontrolnych wzorców chropowatości;
- Elektryczność:
 - 1) porównania bilateralne wzorców stosunku napięć i prądów przemiennych,
 - 2) porównania bilateralne dotyczące pomiarów przetworników AC/DC (napięcie i prąd elektryczny przemienny) oraz w zakresie przenoszenia jednostek miar napięcia i prądu elektrycznego,
 - 3) porównania bilateralne dotyczące pomiarów mocy oraz pomiarów impedancji;
- Fizykochemia:
 - 1) porównania bilateralne przy zastosowaniu wiskozymetrów kapilarnych,
 - 2) porównania bilateralne przy zastosowaniu wiskozymetrów rotacyjnych,
 - 3) porównania bilateralne w obszarze wzorcowania termoelementów typu S i Pt/Pd metodą punktów stałych,
 - 4) współpraca w zakresie budowy w CMI wzorców wilgotności powietrza – generatorów temperatury punktu rosy oraz kontynuacja projektu EURAMET P-1160 „Rozwój wzorców podstawowych temperatury punktu rosy – generatorów punktu rosy”.

Ponadto CMI zaproponowało nawiązanie współpracy w zakresie porównań dwustronnych w dziedzinie (zakresie):

- fizykochemicznych właściwości gazów naturalnych,

**Porozumienie
o Współpracy w Dziedzinie Metrologii**

pomiędzy

**Głównym Urzędem Miar,
Warszawa, Polska**

a

**Czeskim Instytutem Metrologicznym,
Brno, Republika Czeska**

**GLÓWNY URZĄD MIAR (GUM) ORAZ
CZESKI INSTYTUT METROLOGICZNY (ČMI),
zwane dalej „Umawiającymi się Stronami”;**

CHCĄC promować wspólne zainteresowanie rozwojem współpracy w dziedzinie metrologii na zasadach równości i wzajemnych korzyści obu organizacji, reprezentujących swoje kraje w dziedzinie metrologii;

MAJĄC NA WZGLĘDZIE potrzebę międzynarodowej harmonizacji działań w zakresie metrologii na najwyższym poziomie, zwłaszcza porównywalność państwowych wzorców jednostek miar, zadeklarowanych zgodnie z Porozumieniem o Wzajemnym Uznawaniu (MRA CIPM) podpisanym przez dyrektorów krajowych instytucji metrologicznych;

MAJĄC NA WZGLĘDZIE dwustronne zainteresowanie naukową i technologiczną współpracą; oraz

UZNAJĄC, że taka współpraca będzie promować współpracę gospodarczą oraz wspierać przyjazne stosunki między dwoma krajami;

UZGODNIŁY, CO NASTĘPUJE:

Artykuł 1

Umawiające się Strony dążą do współpracy w duchu zaufania w dziedzinie metrologii na zasadach równości i wzajemnych korzyści, zgodnie z postanowieniami niniejszego Porozumienia oraz zgodnie z przepisami ustawowymi i wykonawczymi obu krajów. Aby osiągnąć ten cel, Umawiające się Strony mogą przekazywać sobie wzajemnie informacje dotyczące kluczowych prac oraz osiąganych wyników, dochodząc do porozumienia w sprawie wspólnych projektów w dziedzinie nauki i technologii oraz prowadzić wymianę personelu, zajmującego się tymi dziedzinami.

Artykuł 2

Współpraca między Umawiającymi się Stronami może polegać na:

- a. opracowywaniu i realizacji wspólnych programów i projektów na zasadach wzajemnych korzyści na rzecz rozwoju metrologii;
- b. wzajemnej współpracy w ramach międzynarodowych i regionalnych organizacji metrologicznych;
- c. edukacji i szkoleniach naukowych, w tym wizytach i wymianie naukowców oraz innych ekspertów;
- d. organizacji i udziale we wspólnych spotkaniach, takich jak konferencje, seminaria i szkolenia;
- e. wymianie informacji dotyczących kluczowych prac uzgodnionych przez Umawiające się Strony oraz ich wyników;
- f. innych formach współpracy, na które Umawiające się Strony wyrażą zgodę.

Artykuł 3

Szczegółowe zakresy działań podejmowanych zgodnie z niniejszym Porozumieniem oraz zasady ich finansowania będą ustalone na piśmie przez Umawiające się Strony przed rozpoczęciem tychże działań.

Artykuł 4

Jakiegokolwiek zmiany do niniejszego Porozumienia mogą być wprowadzane w formie odrębnych Protokołów, załączonych do niniejszego Porozumienia, które wejdą w życie w momencie podpisania ich przez Umawiające się Strony.

Artykuł 5

Wątpliwości dotyczące interpretacji i stosowania niniejszego Porozumienia będą rozstrzygane polubownie w drodze konsultacji i negocjacji między Umawiającymi się Stronami.

Artykuł 6

Zadne z postanowień niniejszego Porozumienia nie będzie interpretowane jako pociągające za sobą prawne zobowiązania którejkolwiek z Umawiających się Stron.

Artykuł 7

1. Niniejsze Porozumienie wejdzie w życie z momentem złożenia pod nim podpisów przez przedstawicieli Umawiających się Stron i może być wypowiedziane przez którąkolwiek z Umawiających się Stron, w momencie przedstawienia stosownej notyfikacji o wypowiedzeniu Porozumienia, co najmniej dziewięćdziesiąt (90) dni przed planowaną datą zakończenia obowiązywania Porozumienia.
2. W przypadku rozbieżności przy interpretacji tekst angielski będzie rozstrzygający.

NA DOWÓD CZEGO niżej podpisani zawarli niniejsze Porozumienie.

SPORZĄDZONO w dwóch jednobrzmiących egzemplarzach, w PRAOZE, w dniu 12.07.2011 roku.

W IMIENIU GŁÓWNEGO URZĘDU MIAR,
WARSZAWA, POLSKA:



Pani Janina Maria Popowska
Prezes

W IMIENIU CZEŚKIEGO INSTYTUTU
METROLOGICZNEGO,
BRNO, REPUBLIKA CZEŚKA:



Dr Pavel Klenovsky
Dyrektor Generalny

- drgań,
- pomiarów pola magnetycznego.

CMI jest także zainteresowane dostępem do know-how w zakresie budowy zegarów optycznych, wskazując na swoją aktywność w organizacji światłowodowej sieci dystrybucji sygnału czasu, we współpracy z:

TERENA (www.terena.nl),
 CEENET (www.ceenet.org),
 DANTE (www.dante.net),
 GEANT (www.geant.net),
 GLIF (www.glif.is),
 CESNET (www.cesnet.cz; www.ces.net),
 PCSS (www.man.poznan.pl).

Po zakończeniu omawiania ww. zagadnień nastąpił akt podpisania Porozumienia o Współpracy w Dziedzinie Metrologii, który ze strony GUM sygnowała p. Janina Maria Popowska – Prezes GUM, a ze strony CMI p. Pavel Klenowsky – Dyrektor Generalny CMI.

W drugiej części wizyty delegacja GUM udała się do **Laboratories of fundamental metrology** (LPM) w innej siedzibie CMI, w Pradze, przy ul. V Botanice 4. Pan Jiří Borovský udostępnił możliwość zwizytowania następujących laboratoriów lub stanowisk pomiarowych:

- akustyka,
- radiometria i fotometria,
- wzorce częstotliwości optycznej „mise en pratique” i stanowisko do zdudniania częstotliwości optycznych,
- pomiary trójwspółrzędnościowe.



Prezes GUM pani J. M. Popowska oraz dyrektor generalny CMI pan P. Klenowsky podpisują porozumienie o współpracy GUM z Czeskim Instytutem Metrologicznym

Źródła niepewności przy wzorcowaniu wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym

Piotr Sosinowski

Główny Urząd Miar – Zakład Długości i Kąta

W artykule przedstawiono budowę, posiadanego przez Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM, stanowiska umożliwiającego wzorcowanie wzorców kreskowych o długościach nominalnych od 1 mm do 500 mm, zasadę pomiaru oraz wskazano istotne źródła niepewności występujące podczas wzorcowania. W pracy skupiono się na trzech głównych składowych wpływających na niepewność pomiaru: powtarzalności wskazań, błędzie cosinusowym i sposobie pozycjonowania kreski. Przedstawiono możliwości ich zmniejszenia oraz działania podjęte w celu modernizacji jedyne w kraju stanowiska pomiarowego do wzorcowania wzorców kreskowych. Omówiony został udział Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM w porównaniach międzynarodowych EUROMET.L-K7 w zakresie wzorcowania wzorców kreskowych, których wstępne wyniki potwierdzają jego zdolności pomiarowe.

Sources of uncertainty in calibration of the line scales using the interferometric comparator

The paper presents the construction of measuring station, which is used by the Length Laboratory of Department of Length and Angle of GUM and allows the calibrations of the line scales with nominal length from 1 mm to 500 mm, measuring principle and indicates the important sources of uncertainty occurring during the calibration. The paper focuses on three major components affecting the uncertainty of measurement: repeatability of results of measurements, cosine error and method of positioning lines, presents the possibility of reducing them, and steps taken to modernize the interferometric comparator for calibration of the line scales. At the end there has been presented the share of Length Laboratory of Department of Length and Angle of GUM in international comparisons EUROMET.L-K7 concerning the calibration of line scales, which preliminary results confirm its ability to make measurements.

1. Wprowadzenie

Wzorce kreskowe są ważnymi materialnymi wzorcami długości, używanymi do dokładnego pozycjonowania lub pomiarów w jednym, dwu lub trzech wymiarach. Pełnią istotną rolę w zapewnieniu spójności pomiarów, wykonywanych za pomocą przyrządów takich jak: mikroskopy uniwersalne, projektory pomiarowe, maszyny długościowe, lupy pomiarowe czy, coraz powszechniej stosowanych, systemów wizyjnych do pomiaru długości. Rosnące potrzeby na wzorcowanie tego rodzaju przyrządów oraz konieczność zapewnienia realizacji usług na odpowiednim poziomie wymagają utrzymywania i ciągłej modernizacji jedyne w kraju stanowiska pomiarowego do wzorcowania wzorców kreskowych. Artykuł ma na celu zaprezentowanie, posiadanego przez Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM, stanowiska umożliwiającego wzorcowanie wzorców kreskowych o długościach nominalnych od 1 mm do 500 mm oraz wskazanie istotnych źródeł niepewności występujących podczas ich wzorcowania.

2. Budowa stanowiska pomiarowego

Na rys. 1 przedstawiono komparator interferencyjny do wzorcowania wzorców kreskowych. Stanowisko to znajduje się w pomieszczeniu laboratoryjnym o kontrolowanej tem-

peraturze otoczenia w granicach $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. Ustawione jest na specjalnej, odizolowanej od drgań podłoża, płycie oraz osłonięte obudową zabezpieczającą przed ruchami powietrza. Ponadto główne źródła ciepła umieszczone zostały poza obudową stanowiska.

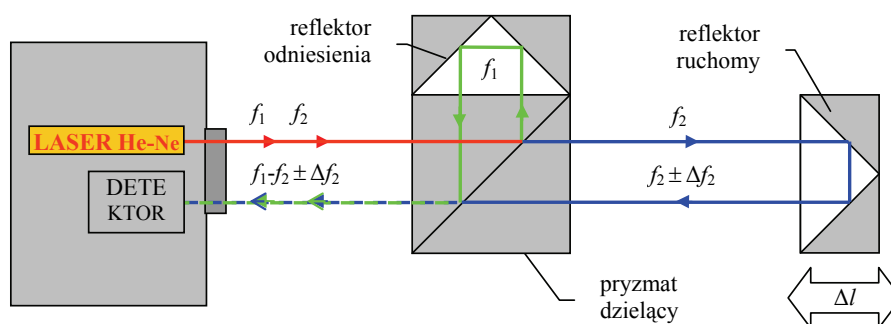


Rys. 1. Stanowisko komparatora interferencyjnego do wzorcowania wzorców kreskowych

Podstawę stanowiska stanowi masywne łożo maszyny długościowej, po którego poziomych prowadnicach porusza się zdalnie sterowana karetką pomiarową z zamontowanym na niej stolikiem pomiarowym, mierzonym wzorcem kreskowym i optyką interferometru laserowego. Kolumna pionowa służy do zamocowania i ustawienia mikroskopu z kamerą CCD, poprzez które obraz kresek wzorca jest przekazywany na ekran monitora. Wzorcem odniesienia jest laser He-Ne interferometru HP-5528A z urządzeniem odczytowym, kompletem trzech czujników temperatury materiału i zespołem kompensacji długości fali w powietrzu.

3. Zasada pomiaru

Zasadę pomiaru, wykorzystywaną podczas wzorcowania wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zasada pomiaru

Wiązka światła emitowanego przez dwuczęstotliwościowy laser He-Ne rozdziela się w pryzmacie dzielącym na dwie wiązki: pomiarową f_2 , która biegnie do reflektora przycelowanego do ruchomej karetki pomiarowej oraz odniesienia f_1 , biegnącą do nieruchomego reflektora odniesienia. Przesunięcie ruchomego reflektora spowoduje, że częstotliwość wiązki f_2 ulegnie zmianie o $\pm \Delta f_2$, zgodnie ze zjawiskiem Dopplera. Po odbiciu wiązki wracają do pryzmatu dzielącego, gdzie w wyniku ich interferencji pojawia się częstotliwość $f_1 - f_2 \pm \Delta f_2$, będąca podstawą do wyznaczenia wartości przesunięcia Δl . Jako wynik pomiaru odległości między dwiema kreskami wzorca przyjmuje się wartość przesunięcia karetki pomiarowej od jednej do drugiej kreski, obserwowanej na ekranie monitora i ręcznie pozycjonowanej symetrycznie w obszarze bisektora. Wartości odległości wskazywane przez interferometr są korygowane ze względu na zmiany w trakcie pomiaru temperatury materiału mierzonego wzorca kreskowego oraz współczynnika załamania światła w powietrzu, w zależności od temperatury powietrza, ciśnienia, wilgotności i zawartości w nim dwutlenku węgla, zgodnie z wzorem Edlena [3].

4. Niepewność pomiaru

Równanie pomiaru stosowane do wyznaczenia odchylenia długości zmierzonej od długości nominalnej wzorca kreskowego określa wzór:

$$d = l - L + l_t + l_E + \delta l_p + \delta l_{\text{poz}} + \delta l_r + \delta l_{\text{NL}} + \delta l_{\text{DP}} + \delta l_A + \delta l_{\text{cos}} + \delta l_{\kappa} + \delta l_{\text{supp}} \quad (1)$$

przy czym poszczególne zmienne powyższego wzoru zostały opisane w tabeli 1.

Dla nieskorelowanych wielkości wejściowych można zapisać równanie niepewności pomiaru w postaci:

$$u^2(d) = c_l^2 \cdot u^2(l) + c_L^2 \cdot u^2(L) + c_t^2 \cdot u^2(l_t) + c_E^2 \cdot u^2(l_E) + c_p^2 \cdot u^2(\delta l_p) + c_{\text{poz}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{poz}}) + c_r^2 \cdot u^2(\delta l_r) + c_{\text{NL}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{NL}}) + c_{\text{DP}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{DP}}) + c_A^2 \cdot u^2(\delta l_A) + c_{\text{cos}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{cos}}) + c_{\kappa}^2 \cdot u^2(\delta l_{\kappa}) + c_{\text{supp}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{supp}}) \quad (2)$$

gdzie składowe niepewności wraz z odpowiednimi współczynnikami wrażliwości c_p , związane z poszczególnymi wielkościami wejściowymi, przedstawiono w tabeli 1. Niepewności standardowe wyznaczono na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa wartości wielkości wejściowych, opartego bądź na seriach obserwacji (metoda typu A) albo na analizie naukowej, bazując na wszystkich dostępnych źródłach informacji (metoda typu B), przypisując im odpowiednio rozkład normalny lub prostokątny. Dla przejrzystości składowe te zostały pogrupowane na trzy kategorie źródeł niepewności pochodzących od: pozycjonowania kreski wzorca kreskowego, interferencyjnego pomiaru przemieszczenia karetki pomiarowej oraz właściwości mierzonego wzorca kreskowego.

W Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM opracowano arkusz kalkulacyjny umożliwiający szacowanie niepewności pomiaru wzorców kreskowych dla zmieniających się parametrów pomiaru. Niepewność rozszerzona wzorcowania wzorców kreskowych obliczona za jego pomocą i zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w Przewodniku [5], przy poziomie ufności ok. 95 % i współczynniku rozszerzenia $k = 2$, wynosi:

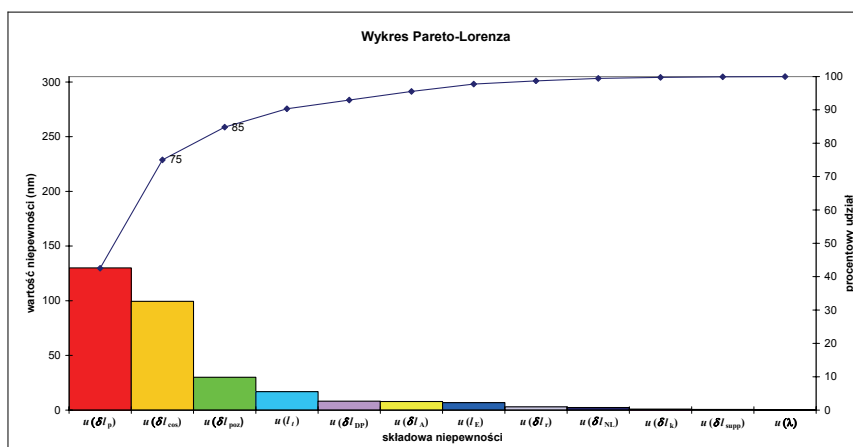
$$U = \sqrt{268^2 + (2 \cdot L)^2} \text{ nm} \quad (3)$$

gdzie L jest długością nominalną wzorca kreskowego wyrażoną w mm.

Tabela 1. Budżet niepewności wzorcowania wzorców kreskowych

Składowa niepewności $u(x_i)$	Źródło niepewności	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	$ c_i \cdot u(x_i)$ (nm)
Pozycjonowanie kreski:				
$u(\delta l_p)$	Powtarzalność	normalny	1	130,00
$u(\delta l_{poz})$	Pozycjonowanie kreski w bisektorze	normalny	1	30,00
Interferencyjny pomiar przemieszczenia:				
$u(\lambda)$	Długość fali promieniowania laserowego	normalny	L/λ	0,0019 L
$u(l_E)$	Współczynnik załamania powietrza:			
$u(n_{air})$	Przybliżenie matematyczne równania Edlana	prostokątny	L	0,0100 L
$u(t_{air})$	Temperatura powietrza	normalny prostokątny prostokątny prostokątny	$-9,57E-07 \cdot L$	0,0341 L
$u(t_{airc})$	wzorcowanie czujnika temp. powietrza			
$u(t_{aird})$	dryft czujnika temp. powietrza			
$u(t_{airv})$	zmiana temperatury powietrza w czasie			
$u(t_{airg})$	gradient temperatury powietrza			
$u(p_{air})$	Ciśnienie powietrza	normalny prostokątny	$2,68E-09 \cdot L$	0,0155 L
$u(p_{airc})$	wzorcowanie czujnika ciśnienia			
$u(p_{aird})$	dryft czujnika ciśnienia			
$u(RH_{air})$	Wilgotność powietrza	normalny prostokątny	$-8,67E-09 \cdot L$	0,0501 L
$u(RH_{airc})$	wzorcowanie miernika wilgotności			
$u(RH_{aird})$	dryft miernika wilgotności			
$u(c_{CO_2})$	Zawartość CO ₂ w powietrzu	normalny prostokątny	$1,45E-10 \cdot L$	0,0084 L
$u(c_{CO_2c})$	wzorcowanie miernika zawartości CO ₂			
$u(c_{CO_2d})$	dryft miernika zawartości CO ₂			
$u(\lambda_{air})$	Długość fali w próżni	normalny	$-1,24E-05 \cdot L$	0,0229 L
$u(\delta l_p)$	Rozdzielczość interferometru	prostokątny	1	2,9
$u(\delta l_{NI})$	Nieliniowość interferometru	prostokątny	1	2,3
$u(\delta l_{DP})$	Nieskompensowanie „drogi martwej”	normalny	1	8,1
$u(\delta l_A)$	Błąd Abbego	prostokątny	1	7,8
$u(\delta l_{cos})$	Błąd cosinusowy:			
$u(\delta l_{cosl})$	związany z adiustacją interferometru	prostokątny	L	0,0180 L
$u(\delta l_{cosW})$	związany z adiustacją wzorca kreskowego	prostokątny	L	0,9934 L
Właściwości wzorca kreskowego:				
$u(l)$	Efekty temperaturowe:			
$u(\alpha)$	Współczynnik rozszerzalności wzorca kreskowego	prostokątny	$\Delta t_s \cdot L$	0,0687 L
$u(\Delta t_s)$	Odchylenie temperatury wzorca kreskowego od 20 °C	normalny prostokątny prostokątny prostokątny prostokątny	$\alpha \cdot L$	0,1532 L
$u(\Delta t_{sc})$	wzorcowanie czujników temp. materiału			
$u(\Delta t_{sd})$	dryft czujników temp. materiału			
$u(\Delta t_{sv})$	zmiana temperatury materiału w czasie			
$u(\Delta t_{sg})$	gradient temperatury materiału			
$u(\alpha) u(\Delta t_s)$	wyrazy wyższego rzędu			
$u(l_k)$	Efekt ściśliwości:			
$u(\kappa)$	Współczynnik ściśliwości wzorca kreskowego	prostokątny	$\Delta p_s \cdot L$	0,0005 L
$u(\Delta p_s)$	Zmienność ciśnienia powietrza podczas pomiaru 101325 Pa	prostokątny	$\kappa \cdot L$	0,0089 L
$u(\delta l_{supp})$	Podparcie wzorca kreskowego	normalny	1	0,6

Przeprowadzone w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM badania składowych wpływających na niepewność pomiaru i ich analiza wskazały na trzy dominujące źródła niepewności: powtarzalność wskazań, błąd cosinusowy i sposób pozycjonowania kreski, co ilustruje rys. 3. Przedstawiona w postaci wykresu analiza Pareto-Lorenza pozwala stwierdzić, że ok. 80 % niepewności pomiaru powoduje tylko ok. 20 % źródeł niepewności (3 składowe), które wymagają szczególnej uwagi i podjęcia działań dążących do ich zmniejszenia.



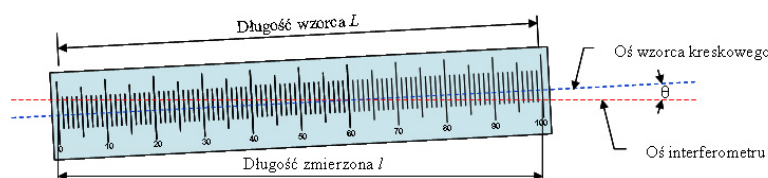
Rys. 3. Wykres procentowego udziału składowych niepewności w niepewności rozszerzonej

Z powyższego wykresu wynika, że główny udział w niepewności rozszerzonej wzorcowania wzorców kreskowych ma powtarzalność pomiaru, szacowana na podstawie n pomiarów odchylenia od długości nominalnej wzorca kreskowego. Niepewność standardowa obliczona jest, jako odchylenie standardowe eksperymentalne średniej, ze wzoru:

$$u(\delta l_{pow}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (d_k - \bar{d})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (4)$$

wynosi 130 nm i została oszacowana na podstawie 8. serii pomiarowych. Zmniejszenie tej wartości wiązałyby się z koniecznością wykonania większej liczby serii pomiarowych i tym samym ze wzrostem czasu potrzebnego na wykonanie dodatkowych pomiarów, co z kolei mogłoby spowodować zwiększenie wpływu na pomiar temperatury i czynników wpływających na pozycjonowanie kreski w bisektorze.

Drugim, równie ważnym źródłem niepewności jest błąd cosinusowy, spowodowany ustawieniem interferometru laserowego względem wzorcowanego wzorca kreskowego. Powstaje on, gdy wiązka promieniowania laserowego jest nierównoległa do osi wzorca kreskowego i powoduje, że zmierzona odległość jest mniejsza niż odległość rzeczywista, co przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Błąd cosinusowy

Gdy karetką pomiarową, z wyjustowanym na niej wzorcem kreskowym równolegle wzdłuż osi wiązki pomiarowej interferometru laserowego, zmienia położenie z punktu A do B, wiązka lasera nie pozostaje prostopadła do płaszczyzny ruchomego reflektora, ale przemieszcza się po jego powierzchni. Zmierzona przez interferometr odległość jest zatem mniejsza od rzeczywistej drogi pokonanej przez karetkę pomiarową, zgodnie z zależnością:

$$l = L \cdot \cos\theta \quad (5)$$

gdzie:

l – odległość zmierzona przez interferometr,

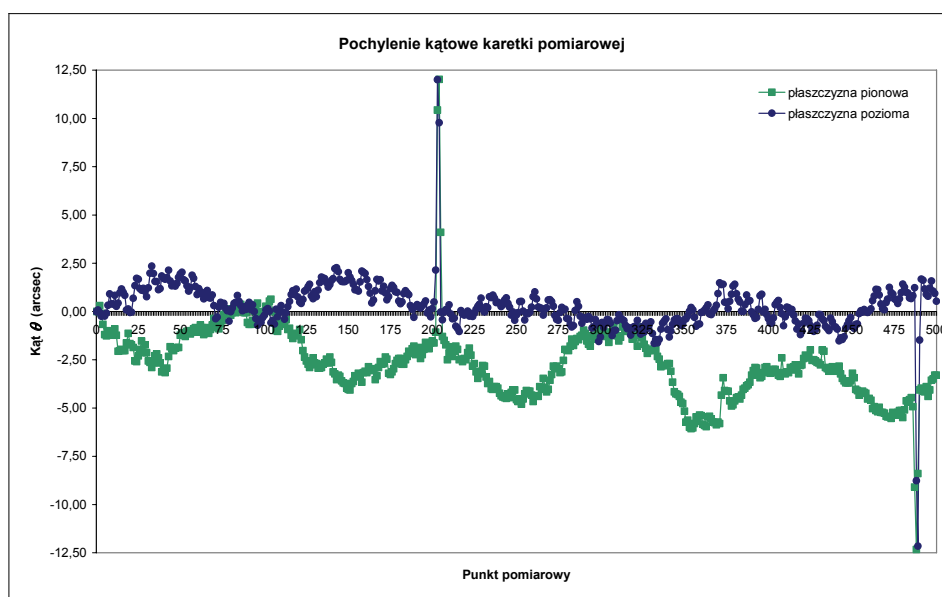
L – długość wzorcowanego wzorca kreskowego,

θ – kąt pochylenia osi wzorca kreskowego względem osi wiązki pomiarowej interferometru laserowego.

Niepewność związana z pochyleniem kątowym θ osi wzorca kreskowego względem osi pomiaru za pomocą interferometru laserowego $u(\delta l_{\cos\theta})$, przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, wynosi:

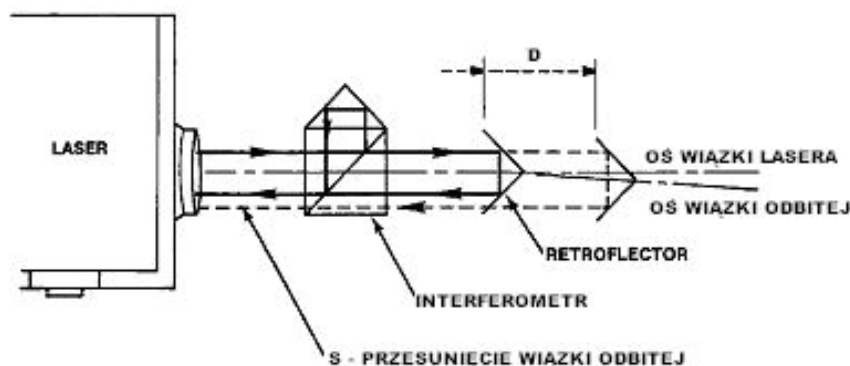
$$u(\delta l_{\cos\theta}) = \frac{(1 - \cos\theta)}{\sqrt{3}} \cdot L \quad (6)$$

Na podstawie pomiarów pochylenia kąтового karetki pomiarowej względem interferometru, w płaszczyźnie poziomej i pionowej, kąt θ oszacowano na ok. 12", co przedstawia rys. 5. Taka wartość kąta powoduje niepewność ok. $1 \cdot L$, czyli 100 nm dla wzorca o długości nominalnej 100 mm.



Rys. 5. Wykres pochylenia kąтового karetki pomiarowej w płaszczyźnie pionowej i poziomej

Jednym ze sposobów zmniejszenia błędu cosinusowego jest przeprowadzenie dokładnego justowania interferometru przed wykonaniem pomiaru, w ten sposób by uzyskać możliwie najmniejsze przesunięcie powrotnej wiązki laserowej odbitej od reflektora interferometru S, co zilustrowano na rys. 6.



Rys. 6. Błąd cosinusowy związany z adiustacją interferometru

Błąd cosinusowy związany z justowaniem interferometru laserowego [4] wyrażony jest wzorem:

$$\frac{S^2}{8 \cdot D^2} \cdot L \quad (7)$$

gdzie:

$S = 0,5 \text{ mm}$ – przesunięcie powrotnej wiązki laserowej odbitej od reflektora interferometru,
 $D = 1000 \text{ mm}$ – odległość reflektora od głowicy lasera.

Niepewność standardowa, przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, wyniesie zatem:

$$u(\delta l_{\cos 1}) = \frac{S^2}{8 \cdot D^2 \cdot \sqrt{3}} \cdot L = \frac{0,5^2}{8 \cdot 1000^2 \cdot \sqrt{3}} \cdot L = 0,0180 L \text{ (nm)} \quad (8)$$

gdzie L w mm.

Znacznie istotniejszym problemem jest jednak nieprostoliniowość przesuwu karetki pomiarowej, która powoduje że w dowolnym punkcie pomiarowym wyjustowany względem niej wzorec jest pochylony pod różnym kątem. Aby to zminimalizować należałoby zastosować prowadnicę, o znacznie mniejszych błędach prostoliniowości. Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM podjęło już odpowiednie działania w tym kierunku i rozpoczęło modernizację przesuwu karetki pomiarowej poprzez zastosowanie prowadnicy granitowej z łożyskami powietrznymi. Łożyska te charakteryzują się precyzją, bardzo niskim współczynnikiem tarcia, dobrą sztywnością i niezwykle dużą żywotnością, co zwiększy odporność na wibracje, umożliwi przesunięcie karetki pomiarowej przy użyciu minimalnej siły napędowej, a przede wszystkim pozwoli na znaczne zmniejszenie odchylenia od prostoliniowości.

Kolejnym istotnym źródłem niepewności jest sposób pozycjonowania kreski w bisektorze, który obecnie polega na wzrokowej obserwacji podziałki wzorca na ekranie monitora i ręcznym wprowadzaniu kreski symetrycznie w jego obszar i zależy od kilku czynników takich jak: ostrość obrazu, oświetlenie, jakość kreski wzorca, powiększenie i wpływ obserwatora. Dla oszacowania niepewności, zmierzono 10 razy odległość między dwoma kolejnymi kreskami, uzyskując odchylenie standardowe eksperymentalne średniej:

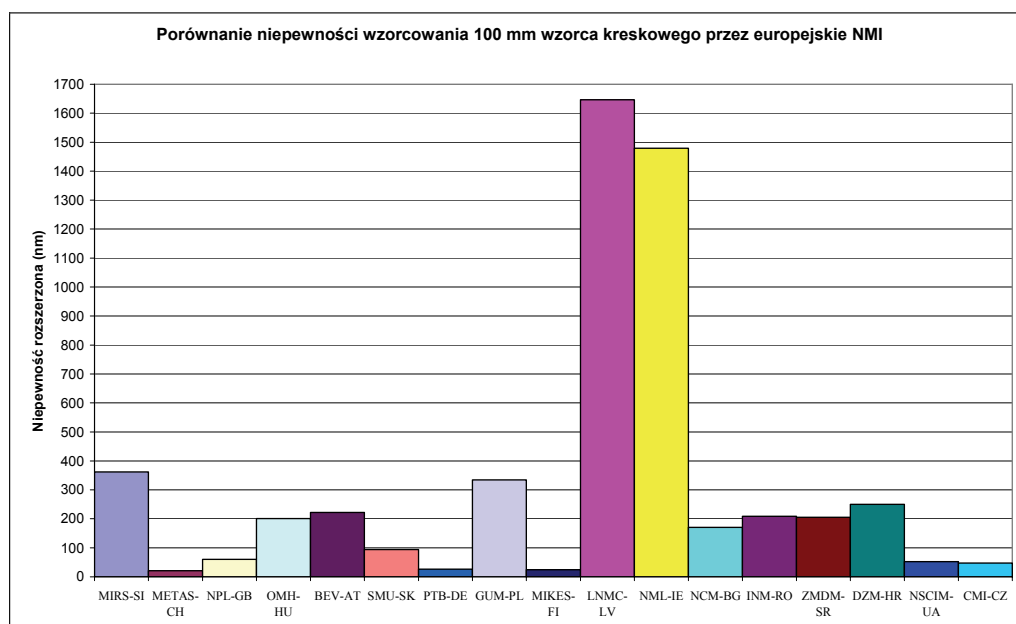
$$u(\delta l_{\text{poz}}) = 30 \text{ nm} \quad (9)$$

W roku 2009 podjęto się opracowania i zastosowania metody automatycznej detekcji środka kreski, opartej na numerycznym obliczaniu położenia środka kreski w zarejestrowanym obrazie podziałki wzorca, w celu wyeliminowania subiektywnej roli obserwatora, a tym samym zmniejszenia niepewności pomiaru związanej zarówno z pozycjonowaniem kreski, jak i z powtarzalnością uzyskiwanych wyników. Analiza obrazu kresek kilku rodzajów wzorców kreskowych wykazała, że głównymi czynnikami wpływającymi na dokładność wyznaczenia środka kreski są: powiększenie układu optycznego, sposób oświetlenia wzorca oraz czystość zarówno układu optycznego, jak i samego wzorca kreskowego. Wykazano, że stosowane boczne podświetlanie nieskolimowaną wiązką powoduje nierównomierność oświetlenia powierzchni wzorca i niesymetryczność otrzymanego profilu kreski, co jest przyczyną przesunięcia środka „ciężkości” profilu kreski i dodatkowego błędu pomiaru. Dodatkową nierównomierność rozkładu jasności w obrazie może powodować różna czułość elementów matrycy CCD stosowanej kamery. Ponadto układ detektora oraz układy formowania, przesyłania i odbioru sygnału video generują szумы, dające efekt „mrowienia się” obrazu, których poziom jest uzależniony od intensywności rejestrowanego obrazu.

Dalsze prace nad zmniejszeniem składnika niepewności związanej z pozycjonowaniem kreski będą kontynuowane po realizacji zakupu profesjonalnego mikroskopu z kamerą cyfrową.

5. Porównania międzynarodowe

W celu potwierdzenia zdolności pomiarowej, w lutym 2007 r., Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM wzięło udział w kluczowych porównaniach międzynarodowych EUROMET.L-K7 w zakresie wzorcowania wzorców kreskowych. Obiektem porównań był wzorec kreskowy o długości nominalnej 100 mm, wykonany ze szkła kwarcowego o małym współczynniku rozszerzalności cieplnej. W porównaniach tych, w grupie A, uczestniczyło siedemnaście Krajowych Instytucji Metrologicznych (NMI). Niepewność rozszerzoną wzorcowania poszczególnych uczestników przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Wykres niepewności rozszerzonej wzorcowania 100 mm wzorca kreskowego przez NMI

Analiza powyższego wykresu oraz opisów stanowisk pomiarowych poszczególnych uczestników porównań, potwierdzają przyjęty plan modernizacji stanowiska pomiarowego polegający na zastosowaniu stolika powietrznego do realizacji precyzyjnego przesuwu wzorca kreskowego oraz wykorzystaniu numerycznej detekcji środka jego kreski.

Wyniki zawarte w projekcie raportu z porównań potwierdzają zdolności pomiarowe Laboratorium w zakresie wzorcowania wzorców kreskowych i dają podstawę do rozszerzenia międzynarodowej listy kwalifikowanych usług, zamieszczanych w tabeli CMC, zgłaszanych przez Laboratorium Długości.

Literatura

- [1] A. Sadowski, E. Miernik, J. Sobol: *Metrologia długości i kąta*. WNT, 1978.
- [2] W. Jakubiec, J. Malinowski: *Metrologia wielkości geometrycznych*. WNT, 1993.
- [3] G. Bönsch, E. Potulski: *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae*. *Metrologia*, vol. 35, 133-139.
- [4] HP 5528A – Laser Measurement System-User's Guide.
- [5] *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*. GUM 1999.
- [6] B. Hemming, I. Palosuo, A. Lassila: *Design of a calibration machine for optical two-dimensional length standards*. *Proceedings of SPIE*, vol. 4902, 670-678.
- [7] TaeBong Eom, JinWan Han: *A precision length measuring system for a variety of linear artefacts*. *Measurement Science and Technology*, vol. 12, 698-701.
- [8] M. Druzovec, B. Acko, A. Godina, T. Welzer: *Simulation of line scale contamination in calibration uncertainty model*. *International Journal of Simulation Modelling* 7 (3), 113-123.
- [9] Draft B Report EUROMET.L-K7 – Key Comparison: Calibration of line scale.

Wzorcowanie mierników indukcji pola magnetycznego

Katarzyna Falińska

Główny Urząd Miar – Zakład Elektryczny

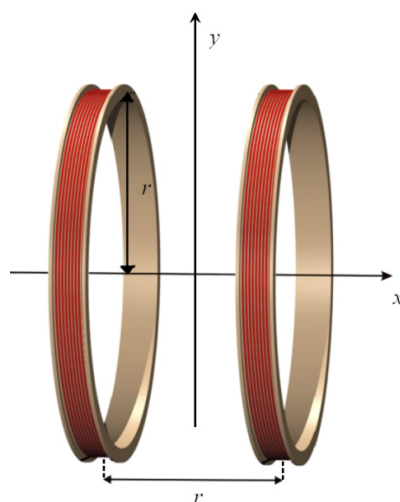
W artykule przedstawiono znajdujące się w GUM wzorce jednostki indukcji pola magnetycznego (cewki Helmholtza). Omówiono stanowisko do wzorcowania mierników pola magnetycznego. Przedstawiono również budżet niepewności i omówiono poszczególne jego składowe. Omówiono wpływ zewnętrznych pól magnetycznych na wyniki pomiarów.

Calibration of magnetic field meters

This paper presents measurement standards of magnetic field induction unit (Helmholtz coils) maintained in the Central Office of Measures. The facility for calibration of magnetic field meters is shown. The uncertainty budget and its particular components are described. The influence of external magnetic fields on calibration is also mentioned in this paper.

1. Wprowadzenie

Używanym w Głównym Urzędzie Miar wzorcem jednostki indukcji pola magnetycznego jest cewka Helmholtza. Jest to układ dwóch jednakowych cewek cylindrycznych, osadzonych współosiowo w ściśle określonej odległości, co schematycznie przedstawia rys. 1. Cewki znajdują się w odległości równej promieniowi cewki r , to pozwala uzyskać jednorodne pole magnetyczne w stosunkowo dużej objętości, np. w punkcie odległym o $\frac{1}{4} r$ od środka układu wzdłuż osi x . Odchylenie od jednorodności w stosunku do wartości natężenia pola magnetycznego w środkowym punkcie układu jest mniejsze od 0,5 %, natomiast wzdłuż osi y jest mniejsze od 0,75 % [1].



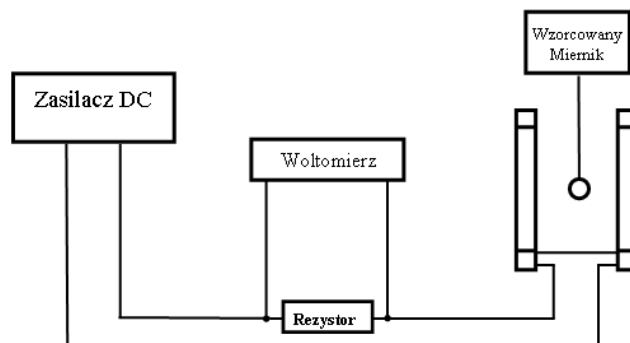
Rys. 1. Schemat cewki Helmholtza

W przypadku cewek wielowarstwowych ważne jest również zachowanie odpowiedniego stosunku szerokości do wysokości w przekroju poprzecznym uzwojeń cewki, który powinien wynosić ok. 0,93 [1].

W GUM dysponujemy trzema różnymi cewkami Helmholtza o średnicach odpowiednio: 0,2 m, 0,4 m i 0,6 m. Uzwojenia cewek zostały wykonane z (różniącego się średnicą) miedzianego drutu nawojowego, emaliowanego o symbolu fabrycznym DNE 180.

2. Stanowisko do wzorcowania mierników indukcji stałego pola magnetycznego

Układ do wzorcowania mierników indukcji stałego pola magnetycznego stanowią cewki Helmholtza zasilane prądem stałym z zasilacza mocy, niskoindukcyjny rezystor i woltomierz. Układ pomiarowy schematycznie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu do wzorcowania hallotronowych sond mierników indukcji magnetycznej stałego pola magnetycznego

Cewki połączone są szeregowo tak, że pola magnetyczne każdej z nich dodają się. Napięcie mierzone na szeregowo podłączonym dokładnym, niskoindukcyjnym rezystorze jest proporcjonalne do natężenia prądu płynącego przez uzwojenia cewek. Wartość indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki wyznacza się ze wzoru:

$$B = \mu_0 I K \quad (1)$$

gdzie: μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, I – natężenie prądu płynącego w uzwojeniach, K – stała cewki. Stała cewek Helmholtza zależy od wymiarów geometrycznych cewek, zgodnie z wyrażeniem:

$$K = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{z}{r} \quad (2)$$

gdzie: z – liczba zwojów cewki, r – promień cewki.

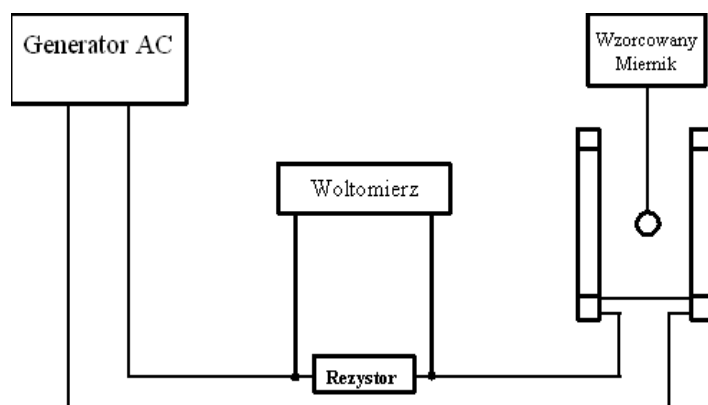
W celu weryfikacji wartości stałych cewek obliczonych ze wzoru (2), wyznaczono je na podstawie przeprowadzonych pomiarów wartości indukcji pola magnetycznego, przy zastosowaniu dokładnego magnetometru. Wartość niepewności względnej używanego miernika – typu Mag-01H [2] – wynosi 0,11 % (świadcstwo wzorcowania PTB 2009 r.).

Podczas wzorcowania sondę miernika indukcji pola magnetycznego umieszcza się w centralnym punkcie przestrzeni pomiędzy cewkami. Dzięki stosunkowo dużemu obszarowi o dużej jednorodności pola magnetycznego, ewentualne nieidealne wycentrowanie sondy miernika nie wpływa znacząco na wartość niepewności wyznaczania wartości indukcji pola magnetycznego.

W celu zminimalizowania wartości tła związanego ze stałym ziemskim polem magnetycznym, wzorcowe cewki Helmholtza ustawia się tak, by linie wytwarzanego przez nie pola magnetycznego były prostopadłe do linii zewnętrznego pola magnetycznego (wówczas jednoosiowa sonda miernika jest „nieczuła” na składową indukcji magnetycznej pola ziemskiego). Ponadto wzorcowanie mierników indukcji pola magnetycznego (zarówno stałego jak i przemiennego) wykonuje się w komorze bezodbiciowej, której ściany pokryte są ferrytowym absorbentem fal elektromagnetycznych, dzięki czemu wartość tła związana z zewnętrznymi polami magnetycznymi (stałym i przemiennym) zmniejsza się o kolejny rząd wielkości. Wykonywanie pomiarów magnetycznych w komorze bezodbiciowej wymaga spełnienia warunku zachowania odpowiedniej odległości cewek Helmholtza od ścian, sufitu oraz podłogi komory, które zbudowane są z materiałów ferromagnetycznych. Zalecany najmniejszy wymiar takiej ekranowanej komory powinien być większy niż $6,7 \cdot r$. Ten wymiar może być również używany do określania, jak daleko od cewek Helmholtza mogą się znajdować duże metaliczne obiekty, aby nie zaburzały wzorcowego pola magnetycznego [3].

3. Stanowisko do wzorcowania mierników indukcji przemiennego pola magnetycznego

Stanowisko do wzorcowania mierników indukcji pola magnetycznego przemiennego jest analogiczne jak dla pola stałego. Inne jest oczywiście źródło zasilania cewki natomiast pozostałe elementy układu są takie same, co schematycznie przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu do wzorcowania sond hallotronowych i cewkowych mierników indukcji magnetycznej pola magnetycznego przemiennego

Wartość górnej granicy zakresu częstotliwości pola magnetycznego, w jakim są wzorcowane mierniki, oczywiście jest mniejsza od wartości częstotliwości rezonansu własnego cewek, które dla cewek znajdujących się w GUM są rzędu kilkudziesięciu kHz.

4. Niepewność pomiaru

Jakość wyniku pomiaru charakteryzowana jest przez niepewność pomiaru, która może być opisana przedziałem rozszerzenia. Granice tego przedziału określają obszar, w którym z określonym prawdopodobieństwem mieści się wartość wielkości. Wynik pomiaru (podczas wzorcowania) wartości indukcji pola magnetycznego podajemy zgodnie z wyrażeniem:

$$B_p = \mu_0 \frac{V_p K}{R} \pm U \quad (3)$$

gdzie: V_p – wartość zmierzonego napięcia, R – rezystancja, U – niepewność rozszerzona dla prawdopodobieństwa 95 %. Niepewność rozszerzona spełnia równanie [5, 6]:

$$U = k \cdot u(B_p) \quad (4)$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia, $u(B_p)$ – złożona niepewność standardowa.

Wśród składowych złożonej niepewności standardowej wyróżniamy niepewności tzw. typu A i B. Wartość niepewności standardowej typu A (w danym przypadku związanej z pomiarem napięcia), wywołanej efektami losowymi, obliczamy na podstawie zaobserwowanego rozrzutu wyników serii pomiarów, jako odchylenie standardowe eksperymentalne wartości średniej wielkości mierzonej, zgodnie z równaniem:

$$u(V_p) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_{pi} - \bar{V}_p)^2} \quad (5)$$

gdzie: V_{pi} – wartość napięcia odczytanego na woltomierzu, n – ilość wykonanych pomiarów.

Składowych niepewności typu B, wywołanych efektami systematycznymi, nie można ocenić na podstawie otrzymanego rozrzutu wyników. Będą to niepewności wynikające z niedoskonałości aparatury pomiarowej. Wyznacza się je na podstawie informacji o możliwym zakresie zmienności danej wielkości, biorąc pod uwagę takie czynniki jak: wcześniejsze wyniki pomiarów, zachowanie i właściwości stosowanych materiałów i przyrządów, specyfikacje producentów, dane wynikające z wzorcowania i innych certyfikatów [8]. Wartości składowych niepewności typu B oblicza się również za pomocą odchyleń standardowych. Zatem przy wzorcowaniu sond mierników indukcji pola magnetycznego będą to składowe związane z wzorcową cewką Helmholtza, woltomierzem i rezystorem. Przy przyjętym założeniu, że błędy stosowanej aparatury pomiarowej mają rozkład prostokątny w granicach $\pm \Delta_g$, niepewność typu B opisana jest zależnością:

$$u = \frac{\Delta_g}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Równanie określające złożoną niepewność standardową dla wartości poprawnej wskazania wzorcowanego miernika indukcji pola magnetycznego, zgodnie z powyższym oraz z wzorem (5) przyjmuje postać:

$$u(B_p) = \sqrt{c_1^2 u^2(\delta h_F) + c_2^2 u^2(V_p) + c_3^2 u^2(\delta V_R) + c_4^2 u^2(\delta V_W) + c_5^2 u^2(\delta K) + c_6^2 u^2(\delta R)} \quad (7)$$

gdzie: $u(\delta h_F)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu niejednorodności pola wzorcowego, $u(\delta V_R)$ – niepewność standardowa wynikająca z rozdzielczości wskazań woltomierza, $u(\delta V_W)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu woltomierza, $u(\delta K)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu wyznaczania stałej cewki K , $u(\delta R)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu wzorcowania opornika.

Tab. 1. Procentowy udział poszczególnych składowych niepewności standardowych w złożonej niepewności standardowej

Typ miernika (rodzaj sondy)	Udziały niepewności					
	$c_1 u(\delta h_F)$ (%)	$c_2 u(V_p)$ (%)	$c_3 u(\delta V_R)$ (%)	$c_4 u(\delta V_W)$ (%)	$c_5 u(\delta K)$ (%)	$c_6 u(\delta R)$ (%)
WKDA (cewkowa)	91,3	0,0	0,0	0,0	4,9	3,8
Unitest (cewkowa)	90,8	0,2	0,2	0,7	4,8	3,3
MFM (halotronowa)	92,6	0,8	0,1	2,1	4,3	0,1
MP100 (halotronowa)	92,3	0,6	2,1	0,5	4,4	0,1

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe, względne udziały poszczególnych składowych niepewności standardowych w złożonej niepewności standardowej dla różnych typów mierników indukcji pola magnetycznego z sondami halotronowymi i cewkowymi. Analizując otrzymane wartości zauważamy, iż zdecydowanie dominuje składowa niepewności związana z niejednorodnością pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki Helmholtza, która stanowi około 90 % złożonej niepewności standardowej. Pozostałe składowe wnoszą wkład rzędu pojedynczych procentów bądź nawet poniżej 1 %.

Zatem w celu zmniejszenia wartości końcowej niepewności całkowitej należałoby podczas wzorcowania korzystać nie z cewek Helmholtza, a z innego wzorca jednostki indukcji pola magnetycznego. Mniejszą niepewność (dla dużych wartości indukcji pola magnetycznego, powyżej 30 mT) możemy uzyskać wzorcując sondy halotronowe w polu wytwarzanym przez elektromagnes, z teslomierzem NMR jako wzorcem odniesienia. Natomiast dla małych wartości indukcji pola magnetycznego rośnie znaczenie tła (na zakłócenie pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki Helmholtza). Pola magnetyczne wolnozmiennie i przemienne, ze względu na ich całkowicie przypadkowy charakter (co do wartości, częstotliwości i fazy), są trudne do całkowitego wyeliminowania. Można jednak zastosować odpowiedniej konstrukcji i grubości ekrany magnetyczne, wykonane np. z mumetalu lub żelaza Armco z umieszczoną wewnątrz cewką solenoidalną, w której wytworzymy wzorcowe pole magnetyczne [9].

5. Podsumowanie

Względna niepewność rozszerzona wzorcowania sond mierników indukcji pola magnetycznego (zarówno stałego jak i przemienne) wynosi: $(1 \div 2,5)$ %. Wartości przedziału można przyjąć za zadowalające, gdyż dokładność wzorcowanych przez nas przyrządów podawana w specyfikacji producenta znajduje się w zakresie $(2 \div 5)$ %.

Osiągnięcie większej dokładności wymagałoby rozbudowy dotychczasowego stanowiska pomiarowego, m.in. zakupu magnetometru NMR i wzorcowych cewek Helmholtza oraz elektromagnesu wytwarzających silniejsze pola magnetyczne. Zakupy te jednocześnie zwiększyłyby kilkukrotnie zakres wykonywanych usług.

Literatura

- [1] M. Nałęcz, J. Jaworski: *Miernictwo magnetyczne*, WNT 1968.
- [2] Bartington Instruments Ltd Operation Manual for Mag-01 and Mag-01H, OMO382, Witney Oxford.
- [3] IEEE Electromagnetic Compatibility Society IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, New York 2005.
- [4] W. Widłaszewski: *Dokument Główny Stanowisko pomiarowe do wzorcowania mierników natężenia pola magnetycznego poniżej 100 kHz*, GUM 2008.
- [5] *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*. GUM, Warszawa, 1999.
- [6] T. Skubis: *Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2004.
- [7] Dokument EA-4/02. *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*. Tłumaczenie GUM, Warszawa, 2001.
- [8] J. Arendarski: *Niepewność Pomiarów*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2003.
- [9] G. K. Yagola, D. I. Cheburkov, A. S. Zaika: *Device for calibrating and testing commercial meters of weak magnetic fields*. Translated for Izmeritel'naya Tekhnika, No 11, 1968.

Konwencja Metryczna a niepewność pomiaru

Paweł Fotowicz

Główny Urząd Miar

Rocznica Konwencji Metrycznej, podpisanej 20 maja 1875 roku, stała się ważną datą dla środowiska metrologicznego, dzisiaj również związaną z obchodami Światowego Dnia Metrologii. Na mocy tej Konwencji społeczność międzynarodowa powołała do życia Międzynarodowe Biuro Miar. Ta naczelna w świecie instytucja metrologiczna od wielu lat stoi na czele zmian jakie dokonują się m. in. w przestrzeni naukowej metrologii teoretycznej. Zmiany te uwidaczniają się w postaci wyrażania niepewności pomiaru.

Można postawić pytanie, czy istnieje jakikolwiek historyczny kontekst łączący współczesne podejście w dziedzinie wyrażania niepewności pomiaru a datą Konwencji Metrycznej. Kontekstem tym jest właśnie rok 1875. W roku tym miało miejsce drugie wydanie pracy Sir George Biddell Airy (1801 – 1892) pt. „On the algebraical and numerical theory of errors of observations and the combination of observations”.

Kim był Sir George. Na pewno osobą zasłużoną dla korony brytyjskiej: przewodniczący Royal Society, dyrektor Królewskiego Obserwatorium Astronomicznego w Greenwich, profesor Uniwersytetu Cambridge, o nie bagatelnych zasługach również dla nauki, szczególnie optyki: odkrywca zjawiska astygmatyzmu i dyfrakcji. Podał opis matematyczny (funkcja Airy) zjawiska dyfrakcji na małym otworze, zwanego plamką Airy.

Airy, choć nie wynika to bezpośrednio z przytoczonego w pełnym brzmieniu tytułu swojej pracy, był również prekursorem pojęcia niepewność (uncertainty). Postuluje rozumienie błędu pomiaru (errors) w kontekście niepewności pomiaru, używając pojęć „uncertain error” lub „uncertainty”. Przez niepewność błędu uważa każdą jego wartość, łącznie z przypadkiem, gdy może on być równy zero. Innymi słowy błąd pomiaru dla Airy to zbiór jego wartości powtarzających się w danym pomiarze z określoną częstością. Z dzisiejszego punktu widzenia można by powiedzieć, że błąd tworzy rozkład prawdopodobieństwa.

Autor stwierdza, na kartach swojej pracy, że prawdopodobieństwo, iż błąd może znaleźć się w przedziale pomiędzy określonym x a $x + \delta x$ wynosi:

$$\frac{1}{c\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{c^2}} \cdot \delta x \quad (1)$$

Jak nie trudno się domyśleć wzór powyższy zawiera równanie krzywej dzwonowej (użycie tej krzywej do opisu rozkładu błędu pomiaru postulował już Gauss). W powyższym wzorze występuje parametr c , który autor nazywa *modulus* i definiuje go jako:

$$c = \text{Error of Mean Square} \times 1,414214 \quad (2)$$

I tu nie trudno się domyśleć, że *modulus* Airy jest równy iloczynowi błędu średniego kwadratowego i pierwiastka z dwóch. Dodatkowo, w konkluzji, autor nazywa wzór (1) prawem częstości błędu (Law of Frequency of Error), które wyraża prawdopodobieństwo określonej wartości błędu zawartej w przedziale pomiędzy x i $x + \delta x$. Jednocześnie stwierdza, że *modulus* jest stały dla określonego pomiaru lecz inny dla różnych pomiarów. Z dzisiejszego punktu widzenia jest to oczywiste, gdyż dla każdej serii pomiarowej uzyskujemy określoną

wartość odchylenia standardowego eksperymentalnego, lecz możliwe są różne jego wartości dla każdej innej serii obserwacji.

Istotnym wnioskiem Airy jest również twierdzenie, że w przypadku łączenia błędów pomiaru X i Y ich wspólny moduł podlega prawu:

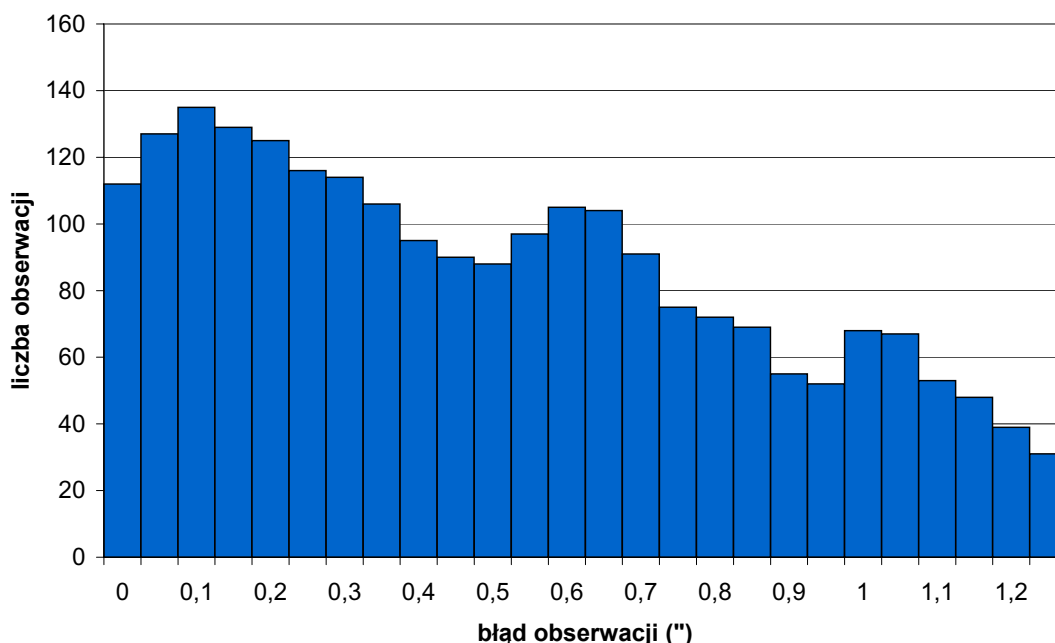
$$\text{square of modulus for } Z = \text{square of modulus for } X + \text{square of modulus for } Y \quad (3)$$

co jest równoznaczne z zapisem współczesnego równia niepewności pomiaru (sumowania wariancji) w postaci:

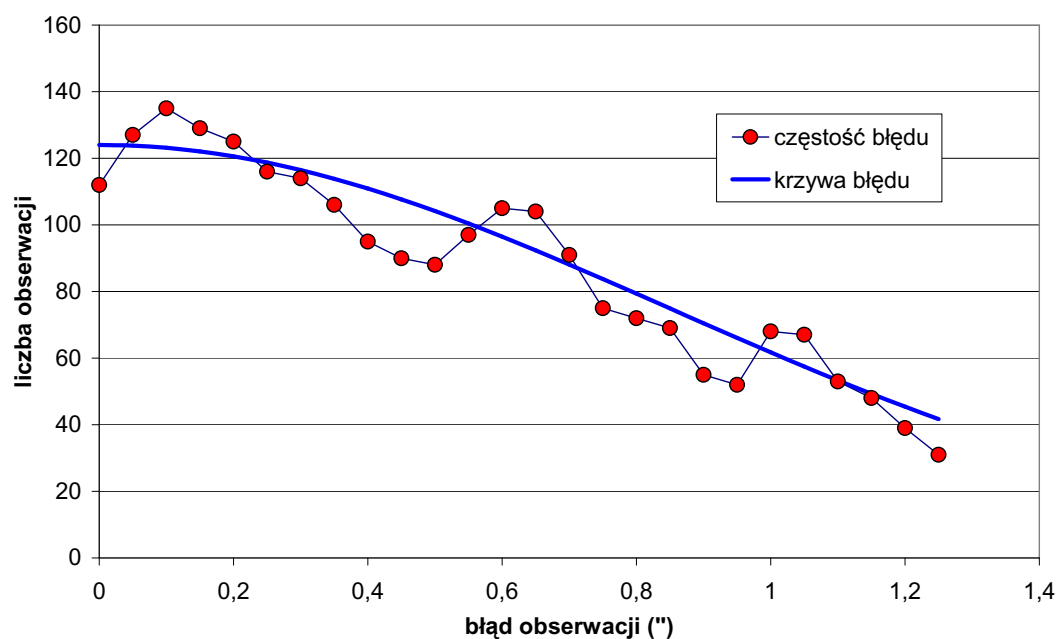
$$u^2(Z) = u^2(X) + u^2(Y) \quad (4)$$

Dodatkowym aspektem dzieła Airy jest również próba doświadczalnego zweryfikowania krzywej błędu. Opiera się tu na wynikach obserwacji Gwiazdy Polarnej wykonywanych w Royal Observatory w latach od 1869 do 1873. Na podstawie zebranych wyników pomiaru oblicza średni błąd obserwacji. Wyznacza błędy wszystkich obserwacji i grupuje je w określonych przez siebie przedziałach wartości, a następnie oblicza, ile z tych wartości znajduje się w poszczególnych grupach. Tworzy w ten sposób histogram błędu pomiaru położenia kąтового Polaris, zmierzonego w królewskim obserwatorium. Na podstawie danych Airy można wyznaczyć histogram, jak na rys. 1. Dodatkowo, autor pracy, oblicza *modulus* i na podstawie tej wartości wyznacza dla każdego przedziału teoretyczną wartość częstości błędu. Uzyskane wyniki obliczeniowe można zobrazować jak na rys. 2.

Pewną ciekawostką językową, związaną z tą pracą Airy, jest to, że podobne obliczenia autor zaleca wykonywać osobie którą nazywa „the computer”. Dziś trudno byłoby sobie wyobrazić wykonywanie obliczeń histogramu błędu pomiaru, bez udziału komputera, szczególnie metodą Monte Carlo, zalecaną przy opracowaniu wyniku pomiaru przez najnowsze dokumenty wydawane przy udziale Międzynarodowego Biura Miar.



Rys. 1. Histogram błędu pomiaru położenia gwiazdy polarnej w Royal Observatory



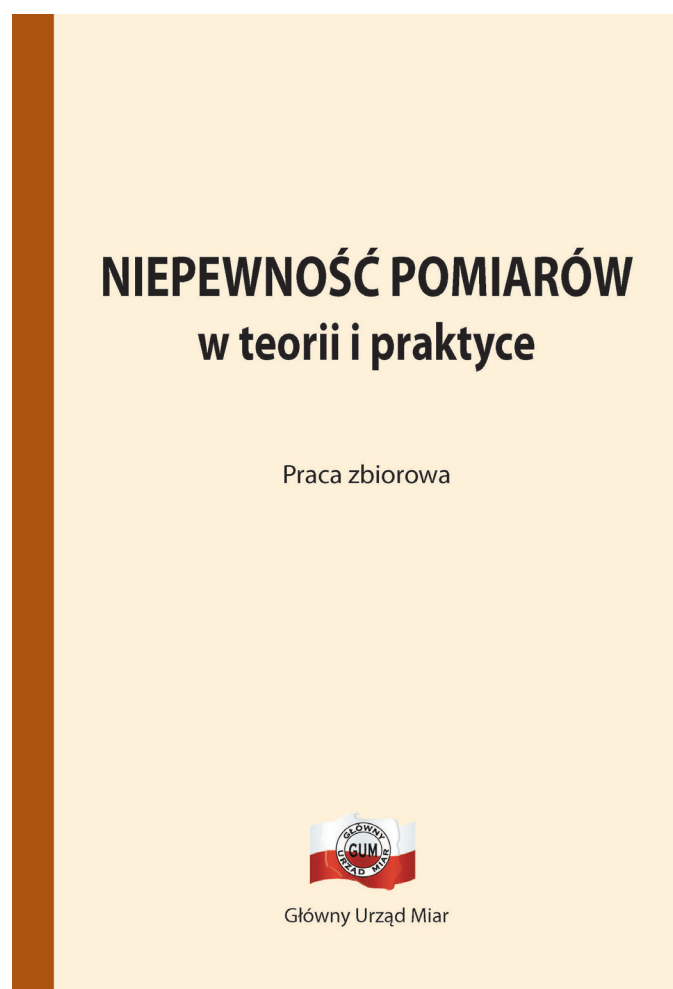
Rys. 2. Eksperymentalny i teoretyczny rozkład błędu pomiaru położenia gwiazdy polarnej

Tak oto rok 1875 rozpoczyna budowanie nowoczesnej metrologii, z jednej strony powołując do życia stabilną strukturę metrologiczną o zasięgu międzynarodowym na mocy Konwencji Metrycznej, a z drugiej wydając dzieło tworzące podstawy współczesnego sposobu wyrażania niepewności pomiaru, łącznie z użytym terminem. Współcześnie wydawane dokumenty pod egidą Międzynarodowego Biura Miar, dotyczące opracowania danych pomiarowych (*Evaluation of measurement data*), czerpią ideowo z pracy Airy, rozwijając koncepcję opisu wielkości mierzonej w postaci zbioru możliwych dla niej wartości, przedstawianych w postaci numerycznie obliczanych rozkładów prawdopodobieństwa.

Rok Konwencji Metrycznej można zatem uznać również za rok niepewności pomiaru, jako terminu i podejścia w dziedzinie opracowania danych pomiarowych.

Monografia

Niepewność pomiarów w teorii i praktyce



Wydana przez Główny Urząd Miar monografia pt. *Niepewność pomiarów w teorii i praktyce* cieszy się dużym zainteresowaniem metrologów. Chcąc przybliżyć problematykę dzieła na dalszych stronach naszego biuletynu publikujemy streszczenia wszystkich jej rozdziałów.

Pozytywny odbiór naszego przedsięwzięcia mobilizuje nas do dalszych wysiłków w celu popularyzacji zagadnień związanych z teoretycznymi podstawami metrologii. Chcemy je realizować we współpracy z różnymi krajowymi środowiskami metrologicznymi, a szczególnie ze środowiskiem akademickim, bowiem współczesna metrologia znacznie rozszerza wachlarz zainteresowań intelektualnych, obejmując swym zasięgiem prawie wszystkie dyscypliny nauk przyrodniczych i technicznych.

Redakcja

Rozdzielczość a niepewność wyniku pomiaru

Albin Czubla

Główny Urząd Miar

W rozdziale przedstawiona jest swoista rewizja praktycznego spojrzenia metrologa na pojęcie rozdzielczości w kontekście niepewności wyniku pomiaru, uwzględniając zarówno sposób uzyskania konkretnego wskazania przyrządu pomiarowego, jak i odmienny punkt widzenia metrologa wykonującego wzorcowanie oraz użytkownika przyrządu pomiarowego.

W konsekwencji założono, że przy szacowaniu niepewności wyniku pomiaru nie tylko nie można automatycznie zaniedbywać wpływu rozdzielczości, ani też automatycznie uwzględniać wpływu rozdzielczości bez zróżnicowania na sytuację pomiarową, ale należy każdorazowo świadomie interpretować jej wpływ na wynik końcowy, zależnie od sposobu realizacji pomiaru, czy faktycznych właściwości i konstrukcji przyrządu pomiarowego. Obok klasycznej interpretacji rozdzielczości wskazania, omówiono również współczesną interpretację rozdzielczości, związaną z działaniem przetworników pomiarowych i rozumianą w sensie statystycznym jako najmniejsza możliwa, statystycznie istotna, różnica pomiędzy obserwowanym wskazaniem a kolejnym (statystycznie nowym) wskazaniem. Interpretacja ta wymaga odmiennego podejścia.

W rozdziale rozważania teoretyczne zilustrowano licznymi schematycznymi rysunkami, pomagającym zrozumieć istotę problemu oraz przykładami z dziedziny pomiarów czasu i częstotliwości.

Przedstawione rozważania nie rozwiewają wszystkich wątpliwości dotyczących udziału rozdzielczości w niepewności wyniku pomiaru, natomiast zachęcają do unikania rutynowego, na rzecz świadomego podejścia do rozdzielczości. W intencji autora, pozwoli to na lepsze rozumienie procesu pomiaru, ewentualną korektę budżetów niepewności i uzyskiwanie bardziej wiarygodnych wyników pomiarów.

Niepewność wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego

Anna Domańska

Politechnika Poznańska

Postęp w dziedzinie elektroniki i cyfrowego przetwarzania sygnałów zmodyfikował architekturę urządzeń pomiarowych, wpływając na sposób i formę realizacji pomiarów. Pojawiła się kategoria systemów pomiarowych, które można utożsamiać z systemem przetwarzania danych. Nazwano je systemami z cyfrowym algorytmem pomiaru (CAP). Proces

pomiarowy jest podzielony na dwa etapy. W pierwszym etapie zbierane są i zapamiętywane dane wejściowe systemu. Ma on charakter pomiaru bezpośredniego. W drugim etapie, na podstawie uprzednio zgromadzonych danych, realizowany jest proces estymacji (lub analizy), w celu określenia wartości wielkości mierzonej. Ma on charakter pomiaru pośredniego.

Elementem każdego systemu z CAP jest przetwornik A/C, który zmienia formę danych uzyskanych w pomiarze bezpośrednim, na formę umożliwiającą realizację pomiaru pośredniego metodą cyfrowego przetwarzania danych lub cyfrowego przetwarzania sygnałów. Umieszczenie przetwornika A/C w konkretnym systemie wyznacza granicę między układową, a programową formą działania systemu.

Specyfika systemów z CAP polega na występowaniu przetwarzania układowego i programowego jednocześnie. W związku z tym pojawia się pytanie, jak należy oceniać niepewność wyniku pomiaru w takim przypadku, czyli gdy występuje nieciągłość formy operacji na danych pomiarowych. Pomimo nieciągłości formy operacji, można zachować ciągłość procesu wyznaczania niepewności wyniku pomiaru, jeżeli określona zostanie niepewność wynikająca z błędów występujących przy zmianie formy danych, czyli wynikająca z błędów przetwornika A/C.

Przedstawiono zasadę oceny niepewności wyniku przetwarzania a-c realną do zastosowania w warunkach rzeczywistych metodą, w której do metrologicznej charakteryzacji są wykorzystywane dostępne dla użytkownika informacje o parametrach przetwornika A/C dostarczane przez producenta. Podano zależność określającą złożoną niepewność standardową błędu pojedynczej wartości przetwarzanej dla przypadku rzeczywistego przetwornika A/C (dyskretyzacja w wartości) i rzeczywistego przetwornika A/C próbkującego (dyskretyzacja w wartości i w czasie). Uwzględniono niepewności wynikające z podstawowych błędów przetwornika, takich jak: błąd wzmocnienia i przesunięcia, błąd nieliniowości całkowitej i różnicowej, błąd kwantowania i szumy oraz błąd niestałości związków fazowych między sąsiednimi próbkami.

Rozdział 3

Metoda obliczania przedziału i współczynnika rozszerzenia przy opracowaniu wyniku pomiaru

Paweł Fotowicz

Główny Urząd Miar

Analityczna metoda obliczania przedziału i współczynnika rozszerzenia powstała w celu opracowania wyniku pomiaru wyrażanego w postaci przedziału rozszerzenia, zgodnie z przyjętymi definicjami zawartymi w najnowszych międzynarodowych, metrologicznych dokumentach dotyczących analizy danych pomiarowych. Metoda jest alternatywna dla zalecanej tam numerycznej metody odniesienia (Monte Carlo), gdy mamy do czynienia z liniowym lub linearyzowanym modelem pomiaru. Przy czym nie wymaga zastosowania zaawansowanych, specjalistycznych programów komputerowych i może być w prosty sposób implementowana do powszechnie dostępnych narzędzi obliczeniowych, np. w postaci arkusza kalkulacyjnego. Jej dokładność obliczeniowa jest porównywalna z metodą odnie-

sienia. Pozwala na wyznaczanie niepewności rozszerzonej dla prawdopodobieństwa 95 % z zachowaniem wiarygodności drugiej cyfry znaczącej przy jej wyrażaniu.

Przedział rozszerzenia został przyjęty jako miara niepewności wielkości mierzonej. Przedział ten obejmuje znaczącą część zbioru możliwych wartości dla wielkości mierzonej. Określa on szerokość rozkładu wielkości mierzonej. Z obliczaniem przedziału rozszerzenia związane jest również zagadnienie wyznaczania współczynnika rozszerzenia, który może być traktowany jak kwantyl rozkładu wielkości mierzonej. Problematyka ta wynika głównie z potrzeby podawania jego wartości w świadectwach wzorcowania przyrządów pomiarowych. Przy opracowaniu wyniku wzorcowania stosuje się na ogół liniowe równania pomiaru, co czyni metodę szczególnie przydatną dla laboratoriów wzorcujących.

Należy dodać, że metodę można stosować przy spełnieniu następujących warunków: wielkość wyjściowa jest funkcją liniową wielkości wejściowych, wielkości wejściowe są zmiennymi losowymi niezależnymi oraz wielkościom wejściowym można przypisać następujące rozkłady: Studenta, normalny, prostokątny, trójkątny lub trapezowy. Konieczność spełnienia tych warunków wynika z zastosowania operacji splotu matematycznego przy obliczaniu rozkładu wynikowego, którą można wykonać, gdy mamy do czynienia z liniową zależnością pomiędzy wielkościami wejściowymi, będącymi jednocześnie zmiennymi losowymi niezależnymi. Jednakże warunki te w niczym nie ograniczają praktycznej stosowalności metody, gdyż przy opracowaniu wyników pomiaru, szczególnie bezpośredniego, z założenia stosuje się modele liniowe pomiaru, zawierające szereg składowych powiązanych ze sobą addytywnie. Przypisywanie tym składowym podstawowym rozkładów prawdopodobieństwa też nie czyni istotnego problemu. Z reguły bowiem przypisuje się im właśnie te rozkłady; Studenta przy analizie składowej przypadkowej, a pozostałe przy ocenie składowych systematycznych. Metoda zatem nadaje się w pełni do analizy wyniku pomiaru bezpośredniego.

Rozdział 4

Współczesne podejście w dziedzinie wyrażania niepewności pomiaru

Paweł Fotowicz

Główny Urząd Miar

We współczesnej metrologii zmienia się podejście w dziedzinie opracowania wyniku pomiaru. Tradycyjna ocena, w postaci statystycznej analizy wyników obserwacji, zastępowana jest probabilistyczną oceną źródeł niepewności związanych z pomiarem wielkości mierzonej.

Koncepcję probabilistycznego opracowania wyniku pomiaru promuje międzynarodowy dokument, zwany Przewodnikiem, wydany w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia przez siedem najważniejszych organizacji metrologicznych. Koncepcja zakłada jednakowe traktowanie, przy opracowaniu wyniku pomiaru, informacji pochodzących z różnych źródeł, szczególnie tych które wywodzą się spoza samego pomiaru, a uzyskanych na podstawie wiarygodnych analiz związanych z opisem procesu pomiarowego. Informacje te

zapisywane są w postaci zmiennych losowych, a dalsze ich przetwarzanie odbywa się zgodnie z regułami rachunku probabilistycznego. Podejście to znajduje potwierdzenie w innych opracowaniach wiodących instytucji w dziedzinie metrologii. W literaturze międzynarodowej szczególne miejsce znajduje w książkach naukowych poświęconych zagadnieniom niepewności pomiaru.

Obecnie opracowywany jest pakiet dokumentów wyznaczający nowy standard w dziedzinie opracowania danych pomiarowych. Pakiet ten firmowany jest przez Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM). W 1997 roku pod przewodnictwem dyrektora BIPM został powołany Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii (JCGM – *Joint Committee for Guides in Metrology*), którego zadaniem jest opracowanie nowych zasad wyrażania niepewności pomiaru i związanej z nimi terminologii. Prace Komitetu toczą się w dwóch grupach roboczych. Pierwsza z nich zajmuje się bezpośrednio zagadnieniami związanymi z niepewnością pomiaru, a druga z problematyką terminologiczną. Owocem działania pierwszej grupy jest zestaw już trzech dokumentów, a owocem pracy drugiej grupy międzynarodowy słownik terminologiczny. Znakiem rozpoznawczym prac pierwszego zespołu jest akronim GUM (*Guide Uncertainty Measurement*), a drugiego akronim VIM (*Vocabulary International Metrology*). Obecnie trwają prace nad kolejnymi dokumentami powyższego pakietu, które będą sukcesywnie upubliczniane, w postaci wersji elektronicznych, dostępnych na stronie internetowej BIPM.

Opracowywane i wdrażane do praktyki metrologicznej dokumenty mają na celu ujednoczenie sposobu wyrażania i obliczania niepewności pomiaru, niezależnie od dziedziny naukowej. Dokumenty te wyznaczają podstawowy kanon opracowania danych pomiarowych, mogący mieć zastosowanie we wszystkich obszarach nauk przyrodniczych i technicznych. Kanon ten w przyszłości może się stać wiodącą metodyką postępowania przy analizie wyniku eksperymentu.

Rozdział 5

Przedziałowy zapis wyniku pojedynczego pomiaru

Jerzy Jakubiec

Politechnika Śląska

Głównym celem tego rozdziału jest przedstawienie spójnego ciągu zależności matematycznych, prowadzącego od opisu pomiaru na zasadzie kwantowania do uzyskania przedziałowego zapisu wyniku pojedynczego pomiaru. Geneza tego tematu tkwi w uwarunkowaniach realizacji pomiarów przy użyciu współczesnych systemów pomiarowych. Mianowicie, wartości mezurandu obliczane są w systemach na podstawie wyników pomiaru próbek sygnału zmiennego w czasie. Zmienność sygnału powoduje, że kolejne próbki mają różne wartości, a zatem każda z próbek może być mierzona tylko jednokrotnie, czyli bez możliwości powtórzenia pomiaru. Niedokładność pomiaru próbek rzutuje na niedokładność algorytmicznego wyznaczania mezurandu, co oznacza że podstawą analizy niedokładności mezurandu musi być ocena niedokładności pomiaru pojedynczej próbki.

Punktem wyjścia opisanego rozumowania jest analiza procesu kwantowania rozpatrywanego jako bezpośrednie porównanie wielkości mierzonej (próbki) z wzorcem o strukturze kwantowej, zbudowanego z elementarnych wzorców tego samego rodzaju o takich samych wartościach, wielokrotnie mniejszych od zakresu przetwornika A/C (kwantyzatora). Z analizy tej wynika definicja błędu, którego probabilistyczny opis stanowi podstawę wprowadzenie matematycznej definicji niepewności pojedynczego wyniku pomiaru, zgodnej z założeniami Przewodnika wyrażania niepewności pomiaru. Zastosowanie tej definicji umożliwia z kolei określenie parametrów przedziału liczbowego, który z zadaniem prawdopodobieństwem obejmuje prawdziwą wartość wielkości kwantowanej. Przedział ten stanowi probabilistyczną reprezentację pojedynczego wyniku pomiaru.

Rozważania teoretyczne zilustrowano przykładem, w którym do realizacji pomiaru użyto przetwornika A/C, charakteryzującego się rozrzutem wartości kwantów. Do wyznaczenia rozkładu błędu wypadkowego tego przetwornika zastosowano metodę Monte Carlo. W końcowej części rozważań opisano wykorzystanie opracowanego aparatu matematycznego do wyznaczania niepewności wartości średniej z serii wyników pomiaru.

Rozdział 6

Obliczenia w pomiarach pośrednich

Stefan Kubisa

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny

W pomiarze pośrednim wielkość mierzoną (mezurand) y oblicza się z pozyskanych w różny sposób (z pomiaru, z dokumentacji używanej aparatury, z tablic fizycznych itp.) wartości wielkości wejściowych $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N$ na podstawie znanej funkcji pomiaru:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N) \quad (1)$$

Rozważa się pomiary laboratoryjne, w których zaobserwowano K wartości każdej z wielkości wejściowych. Obserwacje tworzą macierz – obramowaną część tablicy:

Nr obs.	x_1	x_2	...	x_n	...	x_N	y
1.	x_{1_1}	x_{2_1}	...	x_{n_1}	...	x_{N_1}	y_1
...
k .	x_{1_k}	x_{2_k}	...	x_{n_k}	...	x_{N_k}	y_k
...
K .	x_{1_K}	x_{2_K}	...	x_{n_K}	...	x_{N_K}	y_K
	x_1'	x_2'	...	x_n'	...	x_N'	y'

Estymatę mezurandu i jej niepewność oblicza się na jeden z dwóch sposobów:

1. Przy sposobie **pierwszym** (kolumnami) najpierw oblicza się wartości średnie arytmetyczne x_n' wartości wejściowych x_{n_k} ($n = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K$):

$$xn' = \sum_k xn_k / K \quad (2)$$

a następnie estymatę y' (niepoprawioną!) – jako funkcję (1) tych wartości średnich:

$$y' = f(x1', x2', \dots, xn', \dots, xN') \quad (3)$$

Obliczanie poprawki do estymaty y' oraz niepewności standardowej typu A jest złożone.

2. Przy sposobie **drugim** (wierszami) najpierw oblicza się wartości estymat cząstkowych:

$$y_k = f(x1_k, x2_k, \dots, xn_k, \dots, xN_k); k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

a następnie estymatę y'' jako wartość średnią arytmetyczną estymat cząstkowych:

$$y'' = \sum_k y_k / K \quad (5)$$

Obliczenie niepewności standardowej typu A w tym przypadku jest proste:

$$u_A(y'') = s_m(y'') = \sqrt{\sum_k (y_k - y'')^2 / [K \cdot (K - 1)]} \quad (6)$$

Powierzchowne studiowanie dokumentu *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik* sugeruje wyższość sposobu 1, zaś studiowanie uważne – **wyższość sposobu 2**, zwłaszcza w przypadku pomiaru pośredniego jednoczesnego.

W pracy, za pomocą symulacji Monte Carlo wykazano, że **sposób 2 jest zdecydowanie bardziej godny zaufania** przy pomiarze pośrednim niejednoczesnym, zaś sposób 1 ma nieznaczną przewagę przy pomiarze niejednoczesnym, i to dopiero przy dużej (w praktyce – nierealnej) liczbie obserwacji – np. rzędu 100 i więcej. Przy uważnym studiowaniu *Przewodnika* odnośnie pomiaru niejednoczesnego zauważa się stwierdzenie, że „Jest to faktycznie nie najlepsza procedura pomiarowa ...”.

Rozdział 7

Metody przybliżone obliczania niepewności pomiarów pośrednich

Michał Lisowski

Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Metoda obliczania niepewności pomiarów pośrednich, w których wartość wielkości wyjściowej y jest funkcją wielu wartości wielkości wejściowych x_j , zgodnie z przewodnikiem GEUM (*Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*) jest bardzo pracochłonna. W pomiarach technicznych, wykonywanych na niezbyt wysokim poziomie dokładności,

wystarczające mogą być metody przybliżone szacowania niepewności pomiarów pośrednich, znacznie mniej pracochłonne.

W metodach przybliżonych oddzielnie określa się współczynniki rozszerzenia dla niepewności typu A i B z zależności:

$$U_A(\bar{x}_j) = k_{A_j} u_A(\bar{x}_j), \quad U_B(\bar{x}_j) = k_{B_j} u_B(\bar{x}_j) \quad (1)$$

w których $k_{A_j} = t_{p,v}$ jest współczynnikiem rozszerzenia, równym kwantylowi $t_{p,v}$ rozkładu t -Studenta, $u(\bar{x}_j)$ – niepewnością standardową typu A wartości średniej wielkości wejściowej \bar{x}_j , k_B – współczynnikiem rozszerzenia dla niepewności typu B, $u_B(\bar{x}_j)$ – niepewnością standardową typu B wartości średniej wielkości wejściowej \bar{x}_j .

Niepewności rozszerzone złożone wielkości wejściowych oblicza się z zależności:

$$U(\bar{x}_j) = \sqrt{U_A^2(\bar{x}_j) + U_B^2(\bar{x}_j)}. \quad (2)$$

Jeżeli niepewności typu B mają rozkład prostokątny, to dla poziomu ufności $p = 0,95$ wzór (2) przyjmie postać:

$$U(\bar{x}_j) = \sqrt{U_A^2(\bar{x}_j) + (p\Delta_g \bar{x}_j)^2} \cong \sqrt{U_A^2(\bar{x}_j) + (\Delta_g \bar{x}_j)^2}. \quad (3)$$

Rozważono trzy metody obliczania niepewności rozszerzonej wielkości wyjściowej $U(y)$ gdy:

- 1) niepewności typu A lub B są porównywalne, ale jedna z nich jest większa od drugiej,
- 2) niepewności typu A są pomijalnie małe, a decydujące znaczenia mają niepewności typu B,
- 3) niepewności typu B są pomijalnie małe, a decydujące znaczenia mają niepewności typu A.

Gdy niepewności typu A są większe od niepewności typu B, to:

$$U(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 \left[U_A^2(\bar{x}_j) + (\Delta_g \bar{x}_j)^2 \right]} = \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 U^2(\bar{x}_j)}, \quad (4)$$

natomiast gdy niepewności typu B są większe od niepewności typu A, to:

$$U(y) = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 \left[U_A^2(\bar{x}_j) + (\Delta_g \bar{x}_j)^2 \right]} = 1,15 \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 U^2(\bar{x}_j)}. \quad (5)$$

W pomiarach technicznych bardzo często niepewności typu A są pomijalnie małe, a decydujące znaczenia mają niepewności typu B, wówczas

$$U(y) = U_B(y) = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 \cdot (\Delta_g x_j)^2} = 1,15 \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 \cdot (\Delta_g x_j)^2}. \quad (6)$$

Jeżeli niepewności typu B są pomijalnie małe, a decydujące są niepewności typu A, to:

$$U(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 U_A^2(\bar{x}_j)}. \quad (7)$$

Prawo do niepewności pomiarów

Włodzimierz Popiołek

Główny Urząd Miar

W tym nieco przewrotnie zatytułowanym rozdziale autor wskazuje na wybrane problemy odnoszące się do relacji zachodzących pomiędzy zakresem funkcjonowania prawa w ogólności, a obowiązkiem stosowania oznaczonych wymagań i metod postępowania w czynnościach metrologicznych.

W kontekście tematu wiodącego, jakim jest niepewność pomiarów, omówieniu poddane zostały podstawowe dokumenty (zarówno o charakterze normatywnym jak też instrukcyjnym) odnoszące się do ogółu działań związanych z niepewnością pomiarów.

Zagadnieniem szczególnie istotnym dla metrologa, uczestniczącego także w postępowaniu prawno-administracyjnym, jest kwestia rozumienia norm prawnych i odróżniania ich od innych reguł i kryteriów postępowania, które nie mają charakteru normatywnego. Istnieje przy tym potrzeba permanentnego uświadamiania sobie, przyswajania i przestrzegania podstawowych zasad wyznaczających rozumienie prawa.

Metrologiczne pojęcie „niepewność pomiaru” zostało zdefiniowane w wielu dokumentach opracowanych i wydanych przez instytucje funkcjonujące w obrębie i dla potrzeb trzech głównych obszarów zastosowań tego pojęcia, umownie zwanych:

- 1) metrologia naukowa,
- 2) metrologia prawna,
- 3) akredytacja i certyfikacja.

Często niejednoznaczność terminologiczna, skutkująca różnorodnością zastosowanych metod działania, implikuje konieczność kształtowania takiego postępowania osób uczestniczących w pomiarach lub zainteresowanych wynikami pomiarów, które zapewni racjonalność planowania i realizacji założonych celów. Najbardziej rzecz ujmując, należałoby wystrzegać się zachowań, w których zastosowane rozwiązania z pozoru tylko są właściwe, a w istocie eksponują nienależyte kompetencje i demonstrują właściwości niepożądane w ukształtowanych relacjach społecznych i gospodarczych.

W dokonanym przeglądzie i omówieniu pojęcia „niepewność pomiaru” zauważyć można występowanie różnorodnych jego definicji i sposobów zastosowań. Z uwagi na założone rozmiary opracowania, pominięto omówienie recepcji ww. pojęcia w dokumentach normalizacyjnych. Dla wszystkich rodzajów dokumentów i obszarów zastosowań niewątpliwym jest źródłowy charakter *Guide 99* oraz *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

Reasumując, podkreślenia wymaga stwierdzenie, że w realizacji każdego rodzaju metrologicznych czynności zawodowych, zwłaszcza takich, które mogą nieść oznaczone skutki społeczne, prawne lub ekonomiczne, należy dążyć do racjonalnego doboru stosownych środków i narzędzi, wśród których „niepewność pomiaru” oraz spójne metody jej obliczania nabierają coraz istotniejszego znaczenia.

Niepewność pomiaru dla ciągu obserwacji samoskorelowanych

Andrzej Zięba

Akademia Górniczo-Hutnicza

Praca dotyczy opracowania serii obserwacji x_1, x_2, \dots, x_n , które pozostają równoważne i charakteryzują się normalnym rozkładem błędu pomiaru, ale nie jest spełnione założenie o ich niezależności. W tym przypadku mamy do czynienia z *obserwacjami samoskorelowanymi* (*autocorrelated observations*), których statystyczne własności określa, obok wartości oczekiwanej i wariancji, jednowymiarowa dyskretna funkcja autokorelacji $\{\rho_k\}$, $k = 0, 1, \dots, n - 1$. Optymalnym estymatorem wartości oczekiwanej pozostaje średnia arytmetyczna, natomiast modyfikacji ulegają formuły na estymatory wariancji. Jeżeli funkcja autokorelacji $\{\rho_k\}$ jest znana, możliwe jest wyprowadzenie analitycznych wzorów na nieobciążone estymatory wariancji s_a^2 i wariancji średniej $s_a^2(\bar{x})$, utożsamianej z kwadratem niepewności pomiaru, $s_a^2(\bar{x}) \equiv u^2(x)$. Formalizm wykorzystuje pojęcie *efektywnej liczby obserwacji* n_{eff} zastępującej rzeczywistą liczbę obserwacji n oraz związek pomiędzy wariancją pojedynczego pomiaru i średnią, $s_a^2(\bar{x}) = s_a^2/n_{eff}$. Gdy funkcja autokorelacji jest nieznaną, pozostaje możliwość wykorzystania jej estymaty $\{r_k\}$, obliczonej z posiadanych danych. Podejście analityczne i symulacje MC pozwoliły zbadać własności n_{eff} , s_a^2 i $s_a^2(\bar{x})$, obliczonych przy użyciu estymaty $\{r_k\}$. Znaczące zmniejszenie obciążenia i dyspersji tych estymatorów można uzyskać przez obciążenie $\{r_k\}$ w punkcie jej pierwszego przejścia przez zero. Metodę można stosować, gdy $\{\rho_k\}$ jest nieujemna, z zasięgiem korelacji mniejszym od wielkości próby n .

Metody pomiarowe i szacowanie niepewności w pomiarach higrometrycznych

Krzysztof Flakiewicz, Rafał Jarosz

Główny Urząd Miar

Woda może występować w postaci czystej, w mieszaninie z ciałami stałymi, cieczami, jako składnik roztworów i mieszanin parowo-gazowych (w postaci pary lub gazu). Będąc wszechobecną jest bardzo aktywnym składnikiem, wpływającym silnie na stan środowiska naturalnego, właściwości substancji i materiałów, przebieg procesów naturalnych i przemysłowych. Najczęściej spotykaną naturalną mieszaniną parowo-gazową jest powietrze. W tej pracy zagadnienia omawiane dla powietrza będą dotyczyły także ogólnie gazów i mieszanin parowo-gazowych.

Wilgotność jest pojęciem dotyczącym wybranych aspektów zjawisk związanych z występowaniem wody w różnych postaciach w środowisku i procesach technologicznych. W celu opisu tych procesów konieczne było zdefiniowanie odpowiednich wielkości fizycznych, które w sposób jednoznaczny, ścisły i jednocześnie funkcjonalny określały ilość i charakter wody zawartej w różnych postaciach w przestrzeni i różnych mediach. Niektóre z wielkości zawierają w swojej nazwie termin „wilgotność”, co nieraz jest powodem potocznego stosowania nieprecyzyjnych sformułowań takich jak wysoka/niska wilgotność, które co innego znaczą w przypadku wilgotności bezwzględnej, a co innego w odniesieniu do wilgotności względnej. Dlatego też należy rozróżniać pojęcie wilgotności jako określenie zjawiska od wielkości fizycznych stosowanych do jego opisu.

W praktyce przemysłowej i laboratoryjnej najczęściej wykonywane są pomiary wilgotności względnej i temperatury punktu rosy. Wybór tych wielkości wynika z faktu ich praktycznej przydatności, podyktowanej możliwością pomiaru, bez konieczności uciekania się do złożonych procedur laboratoryjnych. Pomiar tych wielkości, w powiązaniu z pomiarami temperatury i ciśnienia, umożliwia obliczenia również innych wielkości, których bezpośredni pomiar byłby bardzo kłopotliwy, trudny, niedokładny lub niemożliwy. Można więc uznać, że w higrometrii temperatura punktu rosy i temperatura powietrza są to wielkości podstawowe, a wilgotność względna i pozostałe wielkości są wielkościami pochodnymi. Warunkiem kardynalnym jest więc zapewnienie spójności pomiarowej wielkości podstawowych.

Rozdział 11

Problemy oszacowania niepewności pomiarów biomedycznych

Barbara Juroszek

Politechnika Wroclawska

Poznanie rzeczywistości zawsze jest niepełne. Składają się na to błędy pomiaru, które są wynikiem skończonej precyzji opisu badanego obiektu bądź związanych z nim zjawisk. W przypadku badania obiektów technicznych obecność wymienionych składowych niepewności łatwo wcześniej przewidzieć i dlatego można nazwać je *ujawnionymi składowymi niepewności*. Badanie pacjenta, jako obiektu biomedycznego (biologicznego), wiąże się z dodatkowymi, *nieujawnionymi* wpływami, które są źródłem powstania często trudnych do oszacowania składowych niepewności. Należy tu zaliczyć wpływ metody (urządzenia) na przebieg badanego zjawiska, bądź też świadome (lub nieświadome) działanie pacjenta. Tak trudne sytuacje występują podczas diagnostyki różnych układów, a szczególnie układu oddechowego i układu krążenia.

Do wielu dziedzin pomiarów medycznych można wprost aplikować metody stosowane w technice pomiarowej, a w innych konieczne jest stosowanie specyficznych metod, opracowanych tylko dla potrzeb diagnostyki medycznej. Wiarygodne rezultaty uzyskuje się dzięki aparaturze spełniającej odpowiednie, dla danej dziedziny diagnostyki medycznej, standardy pomiarowe. Standaryzacja dotyczy także strony medycznej pomiaru – zachowania pa-

cjenta i lekarza oraz procedury przeprowadzenia testu. Specyficzny jest wzorzec – norma medyczna. Wyznacza się ją dla części populacji, a traktowana jest jako norma obowiązująca całą populację.

Zapewnienie powtarzalności wyników jest trudne do realizacji. Chociaż wymóg powtórzenia badań w tych samych warunkach jest spełniony z technicznego punktu widzenia, to pojawiają się zmienne wyniki pomiarów będące efektem zmienności (często losowej zmienności) mierzonych cech pacjenta. Warunek odtwarzalności wyników może nie być spełniony. Pomiar w zmienionych warunkach może być powodem otrzymania zupełnie innych rezultatów. Zmienione warunki spowodują zmianę parametrów samego obiektu. Cecha „powtarzalność” i „odtwarzalność”, na którą zwraca uwagę Przewodnik „Wyrażanie niepewności pomiaru” może tu mieć odniesienie tylko i wyłącznie do aparatury pomiarowej, ale nie do badanego obiektu, jakim jest pacjent.

W końcowym budżecie niepewności, gdy precyzuje się jej składowe typu A i typu B, udział przyrządu pomiarowego zaznacza się głównie w niepewności typu B. Składowe losowe (niepewność typu A) związane z aparaturą są tu do pominięcia.

Udział pacjenta w budżecie niepewności zaznacza się w dwóch typach składowych. Niepewność typu B może mieć charakter znany, gdy pochodzi od styku pacjent-przyrząd. Wprawdzie oddziaływanie przyrządu na pacjenta wykazuje charakter systematyczny, to zmienność cech pacjenta czyni to oddziaływanie zmiennym, a wynikająca stąd niepewność jest trudna do oszacowania. Taka sytuacja występuje na przykład podczas badania układu oddechowego (natężony wydech), gdy współdziała opór oddechowy z oporem przepływowym przetwornika spirometrycznego.

Składowe losowe niepewności (typu A) pochodzą od cech samego obiektu. Czasem znane są rozkłady prawdopodobieństwa tych cech (często jest to rozkład normalny). Aby ograniczyć losową zmienność rezultatów badania, wynikającą z natury pacjenta, próbuje się formułować standardy jego zachowania podczas badania.

Rozdział 12

Wybrane zagadnienia oceny wiarygodności wyniku pomiaru w medycznym laboratorium diagnostycznym

Przemysław Otomański

Politechnika Poznańska

W rozdziale przedstawiono wybrane zagadnienia oceny wiarygodności metod pomiarowych stosowanych w medycznych laboratoriach diagnostycznych. Zaprezentowano stosowane metody pomiarowe przeznaczone do pomiaru liczby komórek krwi, jak również główne źródła ich błędów pomiarowych. Zwrócono uwagę na specyfikę w podejściu do oceny dokładności metody pomiarowej w medycznym laboratorium diagnostycznym. Wskazano na występujące różnice w porównaniu z podejściem klasycznym i formalizmami matematycznymi, znanymi z metrologii i teorii pomiarów.

W celu oceny wiarygodności pomiarów przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem karty kontrolnej Levey'a i Jenningsa z wykorzystaniem, jako analitu, komórek płytkowych krwi (trombocytów). Przedstawiono interpretację uzyskanych wyników pomiarów kontrolnych z wykorzystaniem kilku reguł prostych i złożonych.

Wielość możliwych sposobów interpretacji wyników pomiarów pozwala postawić fundamentalne pytanie: która opcja będzie najodpowiedniejsza, którą regułę wybrać prostą czy złożoną? W jaki sposób należy ustalić granice kontrolne?

Zdaniem autora nie można udzielić jednoznacznej odpowiedzi na tak sformułowane pytanie. Olbrzymia rola w tym zakresie przypada osobie z dużym doświadczeniem, nadzorującej i interpretującej uzyskane wyniki pomiarów. Praca stanowi próbę wnikliwego spojrzenia, z punktu widzenia metrologa, na stosowane metody i kryteria oceny dokładności fazy analitycznej w medycznym laboratorium diagnostycznym.

Publikacja sygnalizuje tylko pewien skromny wycinek problemów dotyczących statystycznej oceny wyników pomiarów trudnych obiektów, jakimi są obiekty biologiczne. Prezentowana tematyka jest niezwykle rozległa i złożona. Dlatego też nie sposób jest, w ramach niniejszej pracy, rozpatrzyć całości zagadnień związanych z oceną wiarygodności wyniku pomiaru w medycznym laboratorium diagnostycznym z punktu widzenia metrologa. Jednym z celów pracy jest zwrócenie uwagi na to, że praktyka pomiarowa, w tym przypadku niezwykle ważna, bo dotycząca zdrowia ludzkiego, tworzy dla własnych potrzeb specyficzne zasady oceny wyniku pomiaru. Zasady te całkiem dobrze sprawdzają się w praktyce, a jednocześnie niekoniecznie precyzyjnie pokrywają się ze standardami zalecanymi w metrologii.

Rozdział 13

Szacowanie niepewności określenia składu złożonych mieszanin gazowych wytwarzanych metodą grawimetryczną

Andrzej Resztak, Dariusz Cieciora

Główny Urząd Miar

Laboratorium Gazowych Materiałów Odniesienia wykonuje wzorcowe mieszaniny gazowe, w zbiornikach ciśnieniowych, metodą grawimetryczną zgodnie z normą ISO 6142, która jest metodą podstawową, przy zachowaniu warunków określonych w normie. Zawartość poszczególnych składników, w wykonanej w ten sposób mieszaninie, pozwala zapewnić spójność pomiarową do państwowego wzorca jednostki miary masy.

Metoda grawimetryczna polega na napełnianiu butli gazowej gazem czystym lub znaną mieszaniną w odpowiedniej ilości, wyznaczonej poprzez kolejne ważenia. Można ważyć butlę napełnianą lub napełniającą, w zależności od wymaganych warunków. Kolejność wprowadzanych składników zależy od składu, zawartości i prężności par poszczególnych składników gazowych.

- Podczas planowania wytwarzania mieszaniny gazowej należy wziąć pod uwagę:
- ciśnienia dostępnych gazów i możliwość kondensacji,
 - maksymalne ciśnienie napełnienia używanego cylindra,
 - składy mieszanin pośrednich i mieszaniny końcowej,
 - metodę napełnienia (bezpośrednia, wielokrotne rozcieńczenie, metoda ubytku masy),
 - charakterystykę użytej wagi (rozdzielczość, udźwig),
 - wymagania co do końcowego składu i niepewności pomiaru.
- Butla gazowa ważona jest w następującej kolejności:
- butla pusta (po odpompowaniu na pompie turbomolekularnej do ciśnienia rzędu $1 \cdot 10^{-9}$ bar),
 - butla po napełnieniu pierwszym składnikiem,
 - butla po napełnieniu kolejnym składnikiem (aż do gazu dopełniającego).
- Każde ważenie składa się z serii 10 ważeń pozwalających na oszacowanie niepewności związanej z niepewnością wagi, a także pozwala ocenić poprawność ważenia.
- Źródła niepewności ważenia butli gazowych przy wykonywaniu mieszanin gazowych metodą grawimetryczną to:
- waga (rozdzielczość wagi, dryft, punkt zerowy, położenie butli na szalce, nierównomierność wagi, liniowość, czułość, błąd zakresu uchylnego),
 - odważniki (niepewność masy odważników oraz wypór powietrza),
 - różnica objętości butli ważonej i tary,
 - zmiana objętości butli pod wpływem ciśnienia,
 - pozostałości gazu po uzyskaniu próżni,
 - czystość gazu,
 - masa molowa gazu,
 - inne (temperatura butli, adsorpcja).
- Na niepewność wytworzenia mieszaniny gazowej mają wpływ:
- niepewność ważenia gazów wejściowych,
 - niepewność czystości gazów wejściowych,
 - niepewność mas molowych.

Rozdział 14

Analiza dokładności w pomiarach analitycznych

Jan Zakrzewski

Politechnika Śląska

W rozdziale przedstawiono trudności jakie powstają przy próbie podporządkowania procedur pomiarowych obowiązujących w pomiarach analitycznych istniejącym wymaganiom w zakresie prezentowania dokładności pomiarów. Trudności te spowodowane są kilkoma przyczynami:

1. W odróżnieniu od pomiarów wielkości fizycznych, procedura pomiarów analitycznych w chemii, medycynie, biologii i ochronie środowiska zawiera bardzo istotny element w postaci przygotowania próbki. Jest to często najtrudniejsza i najbardziej żmudna

- część procesu pomiarowego. Wpływ poprawności przygotowania próbki na niepewność wyników pomiarów jest trudny do oszacowania i specyficzny dla każdej analizy.
2. Dotychczas walidacja analitycznych metod pomiarowych opierała się na zasadach odmiennych od preferowanych przez przewodnik GUM, który praktycznie nie uwzględnia specyfiki takich pomiarów. Spowodowało to powstanie konfliktów terminologicznych, pojęciowych i proceduralnych.
 3. Certyfikowane materiały odniesienia stosowane w pomiarach analitycznych nie mogą być pod względem swoich właściwości metrologicznych utożsamiane z wzorcami wielkości fizycznych.
 4. Terminy i pojęcia zawarte w dokumentach międzynarodowych wydawanych przez różne organizacje (Eurachem, IUPAC, NIST, IFCC, OIML, ISO itp.) nie są spójne, co wprowadza bałagan i utrudnia proces walidacji i akredytacji laboratoriów.

Byłoby bardzo wskazane, aby instytucje dbające o poprawność metrologiczną (w Polsce, Główny Urząd Miar i Polskie Centrum Akredytacji) wprowadziły unormowania uwzględniające odrębność pomiarów analitycznych i ograniczające skutki bałaganu pojęciowego.

Rozdział 15

Niepewność w metrologii kwantowej wielkości elektrycznych

Edyta Dudek, Marcin Orzepowski

Główny Urząd Miar

Najważniejsze stałe w kwantowej metrologii elektrycznej: stała Josephsona K_J i stała Klitzinga R_K zależą wyłącznie od uniwersalnych stałych: stałej Plancka i ładunku elementarnego elektronu.

Zjawisko, odkryte i opisane przez Briana D. Josephsona w 1962 r., zachodzące w strukturze dwóch nadprzewodników oddzielonych cienką warstwą izolacyjną zostało wykorzystane do praktycznej realizacji nowej generacji wzorca jednostki miary napięcia elektrycznego. W 1987 r. XVIII Generalna Konferencja Miar przyjęła rezolucję, która zaleciła realizację wolta, wykorzystującą wartość stałej Josephsona K_J , wyznaczonej eksperymentalnie i stosowanie jej od 1 stycznia 1990 r. Rok później, w 1991 r., Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) ustanowił umowną, dokładną wartość stałej K_{J-90} .

Stała Josephsona K_J , określa zależność pomiędzy częstotliwością, a napięciem elektrycznym, jakie występują podczas obserwacji kwantowego zjawiska Josephsona. Ma wymiar ilorazu częstotliwości i napięcia elektrycznego:

$$K_J = \frac{2e}{h}$$

W 1980 r. K. von Klitzing zastosował mechanikę kwantową do opisu efektu Halla. W oparciu o jego eksperymenty ustalono wielkość reprezentującą nowy rodzaj wzorca rezystancji. Podano umowną wartość stałej Klitzinga R_{K-90} . W latach 90-tych Komitet Doradczy

ds. Elektryczności (CCE) zalecił odtwarzanie jednostki miary oporu elektrycznego w oparciu o nowy rodzaj wzorców pierwotnych tej jednostki, wykorzystujących kwantowy efekt Halla. Wprowadzenie zaleceń CCE oznaczało dla wszystkich krajowych instytucji metrologicznych (NMI) konieczność zmiany wartości wzorców jednostki miary oporu elektrycznego, odnoszonych do tej pory do tradycyjnego wzorca stanowiącego grupę oporników wzorcowanych w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM).

Stała von Klitzinga (rezystancja von Klitzinga) R_K ma wymiar rezystancji. Stała wyraża, przy pomocy ładunku elementarnego i stałej Plancka, rezystancję poprzeczną wynikającą z kwantowego zjawiska Halla:

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

Wzorce realizujące jednostkę zdefiniowaną przy użyciu stałych fizycznych są najlepszymi reprezentacjami tej jednostki.

Wzorcowanie na stanowiskach kwantowych wzorców napięcia i rezystancji obarczone jest niepewnością, która wynika głównie z niedoskonałości metod przekazywania jednostki oraz szumów własnych wzorców wtórnych. Umownie przyjmuje się, że odtwarzane wielkości fizyczne nie są źródłem niepewności, natomiast systemy pomiarowe służące do porównywania przyrządów wzorcowanych z wzorcem kwantowym muszą być dokładnie scharakteryzowane pod kątem wpływu na niepewność pomiaru.

Rozdział 16

Czynniki wpływające na niepewność pomiaru prądu metodami bezstykowymi

Stanisław Moskowicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny

W rozdziale przedstawiono czynniki wpływające na dokładność pomiaru prądu metodami bezstykowymi. Skupiono się na metodach bezstykowych, nieobejmujących przewodu z mierzonym prądem. Przeprowadzone analizy i wyniki badań oparto o badania transduktorowych przetworników pola magnetycznego o specjalnym rdzeniu permalojowym.

Przetworniki pomiarowe prądu, zapewniające galwaniczną izolację obwodów wejściowych i wyjściowych, wykorzystują pole magnetyczne wokół przewodu, przez który przepływa mierzony prąd. Ze względu na kształt obwodu magnetycznego można podzielić je na dwie zasadnicze odmiany:

- przetworniki z obwodem magnetycznym obejmującym przewód,
- przetworniki z obwodem magnetycznym otwartym.

Do pierwszej grupy, oprócz klasycznych przekładników, można zaliczyć różnego rodzaju przetworniki cęgowe oraz przetworniki z obwodem magnetycznym w postaci toroidu ze szczeliną, w której umieszczono czujnik pola magnetycznego – najczęściej hallotron. Do grupy tej należą również trójrdzeniowe lub dwurdzeniowe przetworniki transduktorowe, przenoszące także składową stałą. Przetworniki te charakteryzują się bardzo wysoką

dokładnością przetwarzania (na poziomie setnych, a nawet tysięcznych części procenta dla wyższych zakresów pomiarowych) i szerokim pasmem częstotliwości (nawet do kilkuset kHz) oraz małymi dryftami temperaturowymi.

Współczesna energoelektronika i związane z nią odkształcone przebiegi prądów i napięć wymagają szerokiego pasma przenoszonych częstotliwości oraz uwzględnienia faktu, że w sygnale wejściowym przetworników może pojawić się składowa stała o wartości, której nie można pominąć przy pomiarach wartości skutecznej przebiegów. Składowa stała, zmieniając punkt pracy rdzeni magnetycznych przetworników, powoduje pogorszenie dokładności przetwarzania. Stąd też wynika konieczność uwzględniania składowej stałej w sygnale wejściowym. Jest to możliwe w układach kompensacyjnych, w których stosuje się przetworniki transformatorowo-transduktorowe wielordzeniowe oraz hallotronowe.

Do drugiej grupy należą przetworniki wykorzystujące czujniki pola magnetycznego, umieszczone w pewnej odległości od przewodu z mierzonym prądem. Przetworniki te pracują także w układach o przetwarzaniu bezpośrednim i w układach kompensacyjnych. W układach bezpośrednich natężenie pola magnetycznego jest wprost przetwarzane na sygnał wyjściowy. W układach kompensacyjnych pole magnetyczne pochodzące od mierzonego prądu jest kompensowane polem wytworzonym przez przepływ prądu kompensującego, przez odpowiednie uzwojenie kompensujące.

W przetwornikach można zastosować dowolne czujniki pola magnetycznego spełniające wymagania dotyczące czułości, rozmiarów geometrycznych oraz stabilności temperaturowej. W tym rozdziale rozważania dotyczą niepewności pomiarów przetwornikami z czujnikami transduktorowymi i hallotronowymi o otwartym obwodzie magnetycznym.

Rozdział 17

Szacowanie niepewności kalibracji wzorców wielkości elektrycznych metodą podstawienia na przykładzie kalibracji kondensatora wzorcowego

Marta Rępańska

Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii

Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii (CWOM) w Warszawie jest najwyższego szczebla laboratorium metrologicznym resortu Obrony Narodowej (ON). Pełni ono kluczową rolę w zakresie zapewnienia spójności pomiarowej i jednolitości, zdecydowanej większości pomiarów, wykonywanych w jednostkach organizacyjnych resortu ON. Wyniki, przeprowadzanych w Ośrodku kalibracji wzorców, przekazywane są ich użytkownikom łącznie z niepewnością pomiaru. Zapewnia to poprawną interpretację wyników pomiarów, dając zarazem użytkownikowi informację o zdolnościach pomiarowych Ośrodka w zakresie kalibracji wzorców wielkości elektrycznych i nieelektrycznych.

W rozdziale, w sposób syntetyczny, zaprezentowano zagadnienia związane z problematyką kalibracji wzorców wielkości elektrycznych metodą podstawienia, ze szczególnym

uwzględnieniem problemu szacowania niepewności tego rodzaju kalibracji. Rozważania teoretyczne poparto odpowiednimi przykładami praktycznymi, dotyczącymi kalibracji kondensatora wzorcowego. Po określeniu wielkości wejściowych, wpływających na złożoną niepewność standardową, skonstruowano stosowne równanie pomiaru. Następnie przedstawiono szczegółową analizę składników złożonej niepewności standardowej. Omówiono przyjęte założenia, zastosowane uproszczenia oraz przedstawiono obliczenia dla rozpatrywanego przykładu kalibracji. W kolejnym etapie zaprezentowano sposób wyznaczenia współczynników wrażliwości poszczególnych wielkości wejściowych.

W części końcowej opracowania, w oparciu o równanie propagacji niepewności, przy założeniu, że wielkości wejściowe nie są ze sobą skorelowane w istotnym stopniu, wyznaczono złożoną niepewność standardową. Wyniki oszacowanych niepewności standardowych, odpowiadające im współczynniki wrażliwości oraz przyjęte rozkłady prawdopodobieństwa zestawiono w tabeli budżetu niepewności. Ponadto, w sposób graficzny, zaprezentowano udziały poszczególnych wielkości wejściowych w złożonej niepewności standardowej oraz wskazano te niepewności standardowe, których wpływ można jeszcze minimalizować i takie, które pozostają niezależne od sposobu i warunków pomiaru.

Rozdział 18

Szacowanie niepewności przy kalibracji ogniów wzorcowych w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii

Emil Woźniak

Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii

W rozdziale zaprezentowano procedurę szacowania niepewności, mającą zastosowanie w procesie kalibracji ogniów wzorcowych w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii. Laboratorium elektryczne Zespołu Wzorców Odniesienia Wielkości Elektrycznych Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii (ZWOWE CWOM) jest laboratorium utrzymującym wojskowe wzorce odniesienia napięcia stałego, rezystancji, pojemności elektrycznej i indukcyjności. Ze względu na umiejscowienie CWOM na szczycie łańcucha spójności pomiarowej w resorcie Obrony Narodowej (ON), laboratorium elektryczne zajmuje kluczowe miejsce w procesie przekazywania jednostek miar wielkości elektrycznych, od wzorców państwowych do wzorców wojskowych ośrodków metrologii i innych jednostek resortu ON. W zakresie pomiarów napięcia stałego od wielu lat stosowanymi w wojskowych ośrodkach metrologii wzorcami napięcia stałego są nasycone ogniwa wzorcowe.

Przekazywanie jednostki napięcia stałego w laboratorium elektrycznym ZWOWE CWOM realizowane jest poprzez kalibrację termostatowanych i nietermostatowanych nasyconych ogniów wzorcowych Westona. Wynikiem kalibracji jest między innymi siła elektromotoryczna (*SEM*) ogniów, parametrem jakościowym wykonywanej kalibracji jest niepewność rozszerzona na przyjętym poziomie ufności.

W rozdziale przedstawiono schemat szacowania niepewności wyznaczania *SEM* nasyconego ogniwa nietermostatowanego Westona w CWOM na praktycznym przykładzie wyników otrzymanych podczas kalibracji wybranego ogniwa wzorcowego. Kalibracja polega na wyznaczeniu wartości poprawnej siły elektromotorycznej (*SEM*) ogniw wzorcowych metodą różnicową z wykorzystaniem półprzewodnikowego wzorcowego źródła napięcia stałego. Zastosowana metoda pomiarowa i układ pomiarowy umożliwiają znaczne wyeliminowanie błędów związanych z wpływem napięć termoelektrycznych w układzie oraz dryftu czasowego napięcia wzorcowego źródła napięcia stałego na wynik kalibracji.

Przedstawiono kolejne etapy procedury szacowania niepewności ze szczególnym uwzględnieniem analizy źródeł niepewności. Dla źródeł niepewności o istotnym udziale w złożonej niepewności standardowej oszacowano niepewności standardowe i związane z nimi współczynniki wrażliwości. Sporządzono budżet niepewności, w którym zamieszczono szczegółowe informacje umożliwiające analizę niepewności. W oparciu o dane z budżetu niepewności wyznaczono złożoną niepewność standardową i niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 95,45 %. Końcowym etapem analizy niepewności jest przedstawienie wyniku pomiaru wraz z niezbędnymi informacjami dotyczącymi wyrażonej niepewności rozszerzonej oraz warunków niezbędnych do zachowania odtwarzalności pomiaru.

Rozdział 19

Obliczanie niepewności pomiaru długich płytek wzorcowych wzorcowanych na maszynie pomiarowej

Dariusz Czulek
Główny Urząd Miar

Zgodnie z zaleceniami normy ISO PN-EN 3650 wzorcowanie płytek wzorcowych o długościach nominalnych większych niż 100 mm wykonywane jest w pozycji poziomej. Wzorcowana płytka podparta jest na odpowiednich podporach, stanowiących wyposażenie maszyny pomiarowej, umieszczonych w odległości 0,211 długości nominalnej od końców płytki, tzw. punkty Airy'go.

Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM posiada stanowisko pomiarowe (precyzyjną maszynę pomiarową 1-D wraz z interferometrem laserowym) umożliwiające wzorcowanie długich płytek wzorcowych o długościach nominalnych (125 ÷ 3000) mm. Stanowisko znajduje się w pomieszczeniu laboratoryjnym o kontrolowanej temperaturze otoczenia w granicach $(20,0 \pm 0,2)$ °C. Pomiarów długich płytek wzorcowych są wykonywane metodą interferencyjną. Płytką wzorcowa o długości nominalnej 10 mm, której błąd długości środkowej wyznaczono metodą interferencyjną, służy do wyzerowania wskazania maszyny 1-D. Pomiar wykonywany jest z wykorzystaniem interferometru laserowego.

Do wielkości wpływających na wyznaczenie odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowej należą:

- długość mierzona,

- długość płytki wzorcowej odniesienia,
- efekty termiczne,
- współczynnik załamania powietrza,
- powtarzalność wskazań,
- rozdzielczość interferometru laserowego,
- błąd Abbe'go,
- błąd cosinusowy,
- lokalizacja środka płytki wzorcowej,
- siła nacisku końcówek pomiarowych,
- przesunięcie punktów podparcia,
- prostopadłość powierzchni pomiarowych.

Dodatkowo w Laboratorium Długości został stworzony program komputerowy wykorzystujący metodę Monte Carlo, jako sposób obliczania niepewności pomiaru. Umożliwia on zwalidowanie niepewności pomiaru wyznaczonej za pomocą prawa propagacji niepewności. Dzięki prostocie obsługi, możliwe jest szybkie wyznaczenie niepewności pomiaru skomplikowanych równań pomiarowych. Metoda Monte Carlo z powodzeniem może też być wykorzystywana do obliczania i sprawdzania wyników porównań międzylaboratoryjnych.

Rozdział 20

Źródła niepewności przy wzorcowaniu płytek wzorcowych metodą interferencyjną reszt ułamkowych

Robert Szumski
Główny Urząd Miar

Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar posiada najdokładniejszy w kraju automatyczny interferometr laserowy do wzorcowania płytek wzorcowych o długościach nominalnych do 300 mm metodą reszt ułamkowych. Umożliwia on pomiar płytek wzorcowych najwyższych klas dokładności o różnych przekrojach oraz wykonanych z różnych materiałów.

Interferometr GBI300 jest połączeniem klasycznego interferometru Twyman'a-Green'a z wysokiej jakości laserami stabilizowanymi częstotliwościowo i sterowaną komputerowo aparaturą pomiarową. Zastosowanie technik komputerowego przetwarzania obrazu do analizy interferogramów sprawia, że pomiar jest mniej zależny od umiejętności operatora i przynosi korzyści w postaci szczegółowych pomiarów płaskości i zmienności długości powierzchni pomiarowych płytek wzorcowych.

Do źródeł niepewności pomiaru płytek wzorcowych za pomocą interferometru GBI300 należą składowe niepewności związane z:

- odczytem wartości reszty ułamkowej i długość emitowanej fali świetlnej,

- efektami temperaturowymi (temperatura płytki wzorcowej, współczynnik rozszerzalności liniowej i składowe drugiego rzędu),
- współczynnikiem załamania powietrza (ciśnienie, temperatura i wilgotność powietrza, zawartość CO₂ w powietrzu, długość fali lasera wzorcowego, dokładność empirycznego wzoru Edlen'a),
- adiustacją układu optycznego interferometru (średnica światłowodu, ogniskowa kolimatora, dokładność adiustacji, wyrazy drugiego rzędu),
- błędem czoła fali powodowanym przez aberracje w układzie optycznym,
- geometrią płytki wzorcowej (odchylenie od płaskości powierzchni pomiarowych i zmienność długości płytki wzorcowej),
- grubością warstwy przywarcia płytki wzorcowej przywartej do stolika pomiarowego,
- zmianą fazy fali przy odbiciu od powierzchni pomiarowej (metoda stosu, poprawka na zmianę fazy),

Powyższe źródła niepewności wnoszą istotny wkład do niepewności złożonej. Zakłada się, że niepewność związana z różnicami we właściwościach optycznych powierzchni pomiarowych płytek i stolika, takich jak np. chropowatość powierzchni, została zawarta w niepewności określenia poprawki na zmianę fazy. Wpływ ciśnienia na długość płytki mierzonej oraz grawitacyjnego skrócenia płytki mierzonej w pozycji pionowej w porównaniu do pomiaru w pozycji poziomej jest pomijalnie mały.

Złożona niepewność pomiaru płytek wzorcowych przy wykorzystaniu tej klasy interferometrów należy do najniższych na świecie.

Obchody Światowego Dnia Metrologii w Głównym Urzędzie Miar

W dniu 20 maja 2011 r. w Głównym Urzędzie Miar odbyły się krajowe obchody, zorganizowane z okazji Światowego Dnia Metrologii, nad którymi honorowy patronat objął Wiceprezes Rady Ministrów, Minister Gospodarki Pan [Waldemar Pawlak](#).

Tegoroczne obchody były wyjątkowe, gdyż swoim tematem nawiązywały do Międzynarodowego Roku Chemii oraz do Roku Marii Skłodowskiej-Curie.

W spotkaniu poza pracownikami Głównego Urzędu Miar udział wzięli Dyrektorzy terenowej administracji miar i terenowej administracji probierczej oraz przedstawiciele świata nauki i kultury m.in. przedstawiciele Polskiej Akademii Nauk, Uniwersytetu Warszawskiego, Instytutu Energii Atomowej POLATOM, Dyrektor Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie, Dyrektor Polskiego Centrum Akredytacji, Dyrektor Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii.

Pani [prof. Barbara Kudrycka](#) – Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego w liście, skierowanym na ręce Pani Prezes [Janiny Marii Popowskiej](#), doceniła aktywną rolę Głównego Urzędu Miar na rzecz popularyzacji metrologii oraz złożyła życzenia dalszych sukcesów.

Uroczystego otwarcia spotkania dokonała Pani [Janina Maria Popowska](#) – Prezes Głównego Urzędu Miar.



Pani Janina Maria Popowska – Prezes Głównego Urzędu Miar (fot. [Piotr Bieńkowski](#))

Po przemówieniu Pani Prezes zaproszeni goście mieli okazję wysłuchać referatu pt. *Misja chemii w początkach XXI wieku* wygłoszonego przez [prof. dr. hab. Janusza Lipkowskiego](#) z Polskiej Akademii Nauk.

Następnie [dr Robert Wielgosz](#) – Dyrektor Departamentu Chemii Międzynarodowego Biura Miar (BIPM) przedstawił prezentację pt. *Chemical measurements for our life, our future*, dotyczącą BIPM, jego wyzwań i głównych działań.



prof. dr hab. Janusz Lipkowski – Polska Akademia Nauk (fot. [Piotr Bieńkowski](#))



dr Robert Wielgosz – Dyrektor Departamentu Chemii (BIPM) (fot. [Piotr Bieńkowski](#))

Bardzo ciekawą prezentację dotyczącą Instytutu Materiałów Odniesienia i Pomiarów Unii Europejskiej (IRMM) wygłosił [prof. Krzysztof Maruszewski](#), zachęcając do ściślejszej współpracy z Instytutem. Zebrani goście mieli okazję poszerzyć wiedzę na temat funkcjonowania Instytutu jako jednostki doradczej w organach Unii Europejskiej.



prof. Krzysztof Maruszewski – Dyrektor IRMM
(fot. Piotr Bieńkowski)

Mając na uwadze, iż rok 2011 jest rokiem Marii Skłodowskiej-Curie zebrani goście wysłuchali referatu Pani [Małgorzaty Sobieszczak-Marciniak](#), Dyrektora Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie o życiu i dokonaniach naszej wybitnej noblistki. Prezentacja zawierała ciekawe zdjęcia oraz plakaty związane z działalnością Marii Skłodowskiej-Curie w zakresie chemii.

Druga część spotkania rozpoczęła się od referatu pt. *Warszawska chemia uniwersytecka na tle doniosłych rocznic i wyzwań współczesności*, wygłoszonego przez [prof. dr. hab. Pawła Kuleszę](#) z Uniwersytetu Warszawskiego, który zaprezentował dorobek Wydziału Chemii oraz osiągnięcia i plany w kontekście dynamicznego rozwoju Centrum Nauk Biologiczno-Chemicznych.

Kolejnym punktem spotkania był referat pt. *Powstanie i rozwój Laboratorium Metrologii Radionuklidów w Świerku* przygotowany przez [dr. Ryszarda Brodę](#) i [dr. Krzysztofa Pochwalskiego](#) z Instytutu Energii Atomowej POLATOM, który jest instytucją ściśle współpracującą z GUM i utrzymującą Państwowy Wzorzec Jednostki Miary Aktywności Promieniotwórczej Radionuklidów. Zebranych gościom została przybliżona zarówno historia Instytutu jak i nowatorskie zadania, które przed nim stoją.

Wystąpieniem kończącym i zarazem spinającym zagadnienia metrologii i chemii był referat pt. *Chemia w GUM – wczoraj, dziś i jutro* wygłoszony przez Panią [dr. Agnieszkę Zoń](#) z Głównego Urzędu Miar, która przedstawiła perspektywy rozwoju Zakładu Fizykochemii.

Na zakończenie spotkania Pani Prezes Janina Maria Popowska ponownie podziękowała wszystkim gościom za przybycie i złożyła życzenia dalszych sukcesów w pracy na rzecz polskiej metrologii.

Po zakończeniu oficjalnej części uroczystości zaproszeni goście mieli możliwość rozmowy oraz wymiany poglądów przy zorganizowanym przez GUM poczęstunku. Uczestnicy spotkania wyrażali swoje zadowolenie z możliwości uczestnictwa w obchodach, jak również z uznaniem odnosili się do zagadnień prezentowanych podczas spotkania.



(fot. Piotr Bieńkowski)

15. Piknik Naukowy Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik

W dniu 28 maja 2011 r. w Warszawie w Parku im. Marszałka Rydza-Śmigłego odbyła się 15. edycja Pikniku Naukowego Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik. Jest to największa w Europie impreza plenerowa popularyzująca naukę. Celem Pikniku jest upowszechnienie wiedzy z różnych dyscyplin nauki. Corocznie impreza przyciągnęła tłumy zwiedzających chcących poznać naukę w sposób zrozumiały dla odbiorców w różnym wieku. Wśród odwiedzających byli rodzice z przedszkolakami, młodzież ucząca się i studiująca oraz wybitni naukowcy.



Tegorocznemu Piknikowi, podobnie jak odbywającej się w Warszawie konferencji Europejskiego Stowarzyszenia Centrów Nauki i Muzeów, towarzyszyło hasło „Wolność”.

Wśród 230 instytucji naukowych i badawczych z kraju i zagranicy biorących udział w Pikniku, po raz kolejny znalazł się Główny Urząd Miar i Okręgowy Urząd Probierczy w Warszawie.



Podobnie jak w latach wcześniejszych stoisko cieszyło się dużym zainteresowaniem zwiedzających. W bieżącym roku zaprezentowaliśmy podczas Pikniku:

- ▶ *pomiary czasu* – na stoisku można było zobaczyć zegar atomowy oraz zapoznać się z jego budową i zasadą działania. Zaprezentowany został także układ do transmisji akustycznych sygnałów czasu do Polskiego Radia. W ten sposób odwiedzający mogli dowiedzieć się w jaki sposób sygnał czasu nadawany w Polskim Radiu jest generowany i transmitowany z Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Elektrycznego



- Głównego Urzędu Miar. Oprócz tego na stanowisku był również chronokomparator cyfrowy, dzięki któremu każdy chętny mógł sprawdzić dokładność swojego zegarka;
- ▶ *wykorzystanie prawa Stokesa do pomiaru lepkości* – pomiar polegał na wyznaczaniu czasu przepływu kulki od górnej do dolnej kresy pomiarowej cylindra wypełnionego badaną cieczą. Przy znanym promieniu i ustalonej gęstości kulki, czas przepływu zależał od lepkości badanej cieczy, co wynika z prawa Stokesa. Obrót przyrządu o 180° umożliwiał wielokrotne powtarzanie pomiaru. Narzędziem pomiarowym, którym posługiwali się zwiedzający wykonujący pomiary, był stoper;
 - ▶ *badanie wyrobów z metali szlachetnych* – istniała możliwość uczestniczenia w badaniu wyrobów z metali szlachetnych metodą przybliżoną na kamieniu probierczym. Przedstawiono również prezentację multimedialną na temat działalności Okręgowego Urzędu Probierczego w Warszawie oraz wizerunki oznaczeń probierczych w Polsce i na świecie.



Wydawca: **Główny Urząd Miar**

Prezes

JANINA MARIA POPOWSKA

tel. (22) 581 95 45, fax 620 84 11,

e-mail: prjp@gum.gov.pl

Wiceprezes do spraw metrologii naukowej

WŁODZIMIERZ POPIOŁEK

tel. (22) 581 95 49, fax 620 84 11, e-mail: vprwp@gum.gov.pl

Wiceprezes do spraw metrologii prawnej

DOROTA HABICH

tel. (22) 581 93 26, fax 624 25 73,

e-mail: vprdh@gum.gov.pl

Dyrektor Generalny Urzędu

tel. (22) 581 93 78, fax 624 02 68, e-mail: dgu@gum.gov.pl

Redakcja: **Paweł Fotowicz** tel. (22) 581 92 95, e-mail: uncert@gum.gov.pl