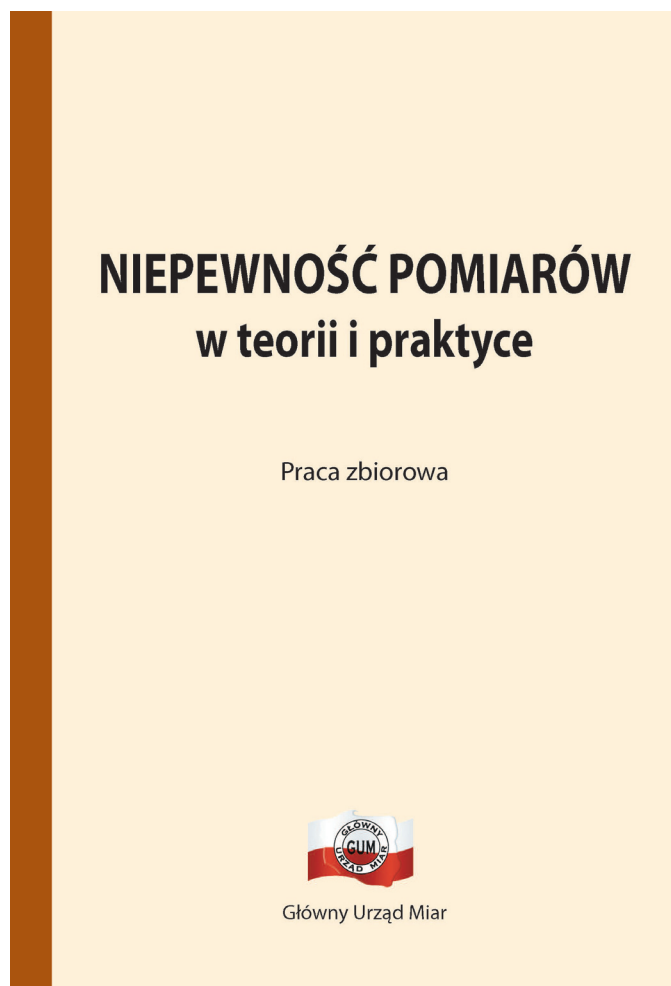


Monografia

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, nierównoramienności 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 ogniw wzorcowych w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii

Emil Woźniak

Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii

W rozdziale zaprezentowano procedurę szacowania niepewności, mającą zastosowanie w procesie kalibracji ogniw 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 ogniw wzorcowych Westona. Wynikiem kalibracji jest między innymi siła elektromotoryczna (*SEM*) ogniw, 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.