

Niepewność pomiaru

Niepewność pomiaru to z jeden z podstawowych terminów jakim posługuje się współczesna metrologia. Zdefiniowana jest jako parametr charakteryzujący rozproszenie wartości wielkości przyporządkowany do menzurandu, obliczony na podstawie uzyskanej informacji, przy czym przez menzurand rozumie się wielkość, która ma być zmierzona. Parametry te mają swoje określone nazwy takie jak: niepewność standardowa, złożona niepewność standardowa, niepewność rozszerzona czy przedział rozszerzenia. Posiadają też swoje ścisłe definicje matematyczne zgodne z przyjętymi w probablistyce, opartej na rachunku zmiennych losowych i ich rozkładach prawdopodobieństwa.

Termin *niepewność pomiaru* symbolizuje również związaną z nim teorię dotyczącą opracowania danych pomiarowych. Początki jej kształtowały się w już osiemnastym stuleciu. Poprzedzała je analiza matematyczna, w postaci rachunku różniczkowego i całkowego, stwarzająca niezbędny aparat intelektualny mający zastosowanie przy analizie danych pomiarowych. Ponieważ wyniki pomiaru tej samej wielkości często nie są takie same, to powstaje zagadnienie dotyczące związanego z nimi błędu pomiaru, czyli różnicy pomiędzy otrzymaną wartością obserwacji a hipotetyczną jej wartością prawdziwą. Zdawano sobie sprawę, że powtarzając pomiary w ten sam sposób i tym samym przyrządem pomiarowym nie uzyskujemy tych samych wyników, gdyż różnią się od siebie nieznacznie, tworząc pewien przedział zmienności.

Już w siedemnastym wieku Galileusz twierdził, że istnieje tylko jedna wartość prawdziwa związana z wielkością mierzoną, a wszystkie obserwacje obciążone są błędami spowodowanymi przez obserwatora, przyrząd pomiarowy i warunki, w których są wykonywane. Sądził również, że obserwacje rozłożone są symetrycznie wokół wartości prawdziwej, a wartości wyrażające błąd pomiaru rozłożone są symetrycznie wokół zera, przy czym uważał, że małe błędy powtarzają się częściej niż duże. Spostrzeżenia te dobrze określają specyfikę wyniku pomiaru i następnym

stuleciu doprowadziły do sformułowania podstawowych rozwiązań w dziedzinie opracowania danych pomiarowych idących w kierunku określenia tzw. krzywej błędu, będącej obwiednią rozkładu tych wyników.

W drugiej połowie XVIII stulecia matematyk francuski Laplace formułuje trzy warunki dotyczącej krzywej błędu, a mianowicie, że ma być symetryczna względem wartości prawdziwej, gdyż obserwacje jednakowo odchylają się od niej w kierunku wartości większych, jak i mniejszych; musi zdążać do zera, oddalając się od wartości prawdziwej, gdyż prawdopodobieństwo, że wartość obserwacji może być nieskończenie różna od wartości prawdziwej jest równe zeru; obszar (pole powierzchni pod krzywą błędu) musi liczbowo być równy jeden, gdyż pewne jest zdarzenie, że każda obserwacja zawarta jest pod tą krzywą. Te trzy warunki Laplace'a może spełniać wiele krzywych, ale jedna z nich zasługuje na szczególną uwagę. Jest nią krzywa dzwonowa, a swoją nazwę wywodzi od charakterystycznego kształtu przekroju dzwonu. Do oceny rozkładu błędu pomiaru, na początku XIX wieku, postuluje ją niemiecki matematyk Gauss. Krzywa ta ma fundamentalne znaczenie przy opisie zjawisk występujących w naturze i pojawia się wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z powtarzalnością zdarzeń losowych. Jest obserwowana jako krzywa rozkładu wyników otrzymywanych przy wielokrotnym powtarzaniu tego samego działania, w tym przy pomiarze tej samej wielkości, mierzonej tym samym przyrządem i w tych samych warunkach pomiarowych. Aby ów rozkład wyników pomiaru odróżnić od samego błędu pomiaru, już w drugiej połowie XIX stulecia angielski prekursor teorii błędu Airy postuluje nazwać go niepewnością pomiaru.

Współczesna metrologia przeszła długą drogę od teorii krzywej błędu do obecnego podejścia w dziedzinie opracowania danych pomiarowych. Dzisiaj podejście to kształtuje pakiet dokumentów wydawanych pod egidą Międzynarodowego Biura Miar (BIPM) przez Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii (JCGM). Obecnie pakiet tych dokumentów tworzy zbiór sześciu opracowań:

- 1) Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008,
- 2) An introduction to the Guide and related documents. JCGM 104:2009,
- 3) Supplement 1 to the Guide – Propagation of distribution using a Monte Carlo method. JCGM 101:2008,
- 4) Supplement 2 to the Guide – Extension to any number of output quantities. JCGM 102:2011,
- 5) The role of measurement uncertainty in conformity assessment. JCGM 106:2012,
- 6) Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models. JCGM GUM-6:2020.

W pakiecie tym kluczową rolę odgrywa Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru, wymieniony jako pierwszy z powyższych dokumentów. Zawiera bazowe rozwiązania niezbędne do obliczania niepewności przy zastosowaniu prawa jej propagacji. Definiuje podstawowe pojęcia stosowane w tym obszarze, takie jak niepewność standardowa, złożona niepewność standardowa czy niepewność rozszerzona. Przedstawia sposoby zapisu niepewności pomiaru i zawiera wskazówki praktyczne co do sposobu obliczania jej składowych.

Historia Przewodnika rozpoczyna się od listu, jaki w 1977 r. ówczesny Dyrektor NBS (National Bureau of Standards) przesłał na ręce Dyrektora BIPM, podkreślając w nim potrzebę jednolitego sposobu wyrażania niepewności pomiaru, sugerując jednocześnie powołanie przez Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) grupy roboczej, która mogłaby zająć się opracowaniem odpowiednich zasad postępowania. CIPM wiedząc, że brakuje zgodności poglądów co do jednolitego sposobu wyrażania niepewności pomiaru, zobowiązał BIPM, aby w porozumieniu z krajowymi instytucjami metrologicznymi zajął się tym problemem i opracował odpowiednie zalecenia. BIPM przygotował w tej sprawie odpowiedni szczegółowy kwestionariusz, który rozesłał do krajowych i międzynarodowych instytucji metrologicznych. Większość z nich odpowiedziała pozytywnie na przedłożoną inicjatywę. Na podstawie przesłanych odpowiedzi można było dojść do wniosku, że istnieje silna potrzeba opracowania jednolitej procedury postępowania w dziedzinie opracowania danych pomiarowych. Jednakże nie było zgodności co do metody, jaką należy zastosować. Dlatego BIPM zorganizował spotkanie mające na celu opracowanie jednolitej procedury określania niepewności pomiaru. W spotkaniu uczestniczyli eksperci z Krajowych Instytucji Metrologicznych (NMI), powołując Grupę Roboczą ds. Określania Niepewności (Working Group on the Statement of Uncertainties), która sformułowała w 1980 r. Zalecenie INC-1 pt. „Wyrażanie niepewności eksperymentalnych”. Zalecenia te stały się podstawą opracowania Przewodnika. Pracę nad nim powierzono specjalnie utworzonej Doradczej Grupie Technicznej ISO ds. Metrologii TAG 4 (Technical Advisory Group on Metrology), w skład której wchodziłi, oprócz BIPM, przedstawiciele sześciu innych międzynarodowych organizacji metrologicznych, w tym Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej (ISO). Efektem pracy tej grupy było pierwsze wydanie Przewodnika w 1993 r. i jego ponowienie w 1995 r. Poprawione wydanie z 1995 r. stało się podstawą do opracowania wersji elektronicznej, upublicznionej na stronie internetowej BIPM w 2008 r.

Podstawową ideą Przewodnika jest to, że niepewność wyniku pomiaru jest utworzona z szeregu składowych, które można podzielić na dwie kategorie w zależności od przyjętej metody obliczeniowej. Idea ta opiera się na następujących przesłankach:

- a) obliczanie niepewności składowych może być wykonywane metodą typu A i B,
- b) metoda typu A polega na analizie statystycznej serii obserwacji,
- c) metoda typu B polega na analizie innej niż statystyczna,
- d) niepewność złożona otrzymywana jest metodą składania wariancji,
- e) niepewność całkowita jest powiększona w stosunku do niepewności złożonej.

Podział składowych na niepewności obliczane metodą typu A i B sankcjonuje tradycyjny, stosowany w metrologii, podział na niepewności przypadkowe i systematyczne, lecz ich tak nie nazywa. Pierwsze z tych składowych obliczane są tradycyjną metodą statystyczną wyrastającą z analizy wariancji eksperymentalnej. Drugie to składowe wyznaczone na podstawie wiedzy o pomiarze, których analiza statystyczna nie obejmuje. Tu stosowane jest podejście probabilistyczne, polegające na przypisaniu określonego rozkładu prawdopodobieństwa i wyznaczeniu niepewności w postaci parametru takiego rozkładu, którym jest odchylenie standardowe. W obu przypadkach można

łączyć niepewności standardowe metodą składania wariancji, a powstałą w ten sposób niepewność złożoną i stosownie powiększoną o określony współczynnik należy związać z wynikiem pomiaru.

Podstawową zasadą postępowania wyrażonego w Przewodniku jest modelowanie pomiaru, któremu specjalnie poświęcony jest ostatni z wymienionych dokumentów. Model pomiaru bowiem jednoznacznie określa wielkość, która ma być zmierzona. Wielkość ta nazywana jest menzurandem. Menzurand, traktowany jako wielkość wyjściowa, opisywany jest funkcją pomiaru. Argumentami tej funkcji są wielkości wejściowe, będące podstawą dla określania składowych niepewności pomiaru. Z każdą z takich składowych należy związać niepewność standardową. Niepewność standardowa wyrażana jest w postaci odchylenia standardowego. W przypadku metody typu A jest to zawsze odchylenie standardowe eksperymentalne średniej, obliczane na podstawie próby losowej. W przypadku metody typu B jest to odchylenie standardowe rozkładu przypisywanego wielkości wejściowej na podstawie dostępnej informacji. Otrzymane w ten sposób niepewności standardowe sumuje się przy użyciu formuły nazywanej prawem propagacji niepewności, wyznaczając w ten sposób złożoną niepewność standardową. Zastosowana formuła powstała na bazie rozwinięcia funkcji pomiaru w szereg Taylora o wyrazach pierwszego rzędu zawierających pochodne cząstkowe, nazywane współczynnikami wrażliwości. W obliczeniach uwzględnić można również niezbędne korelacje pomiędzy poszczególnymi parami wielkości wejściowych. Jednakże w podstawowym podejściu, na ogół, przyjmuje się założenie o braku korelacji pomiędzy wielkościami wejściowymi.

Podstawą podawania wyniku pomiaru jest określanie odpowiedniego przedziału jego zmienności, nazywanego przedziałem rozszerzenia. Przedział ten wyznacza odpowiednio powiększona niepewność standardowa złożona, przy użyciu współczynnika rozszerzenia, nazywana niepewnością rozszerzoną. Ona jest właściwą i zalecaną miarą niepewności związaną z wynikiem pomiaru. Współczynnik rozszerzenia natomiast określany jest na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa związanego z menzurandem i przyjętej umownie wartości prawdopodobieństwa rozszerzenia, na ogół 95 %.

Ważnym z opracowań jest Suplement 1 do Przewodnika. Dokument zawiera wytyczne co do nowego podejścia w dziedzinie wyrażania niepewności pomiaru. Podstawową jego ideą jest zasada propagacji rozkładów, realizowana poprzez model matematyczny pomiaru przy użyciu metody Monte Carlo. Miarą wyniku pomiaru jest rozkład prawdopodobieństwa związany z wielkością wyjściową, wyznaczany na podstawie rozkładów wielkości wejściowych. Wynik pomiaru przedstawiany jest w postaci parametrów tego rozkładu: wartości oczekiwanej, odchylenia standardowego i kwantyli rozkładu dla określonego prawdopodobieństwa, jako granic przedziału rozszerzenia. Dokument przedstawia zalecaną procedurę Monte Carlo, umożliwiającą obliczanie wszystkich tych parametrów. Wartość oczekiwana traktowana jest jak najlepsza estymata wielkości wyjściowej, a odchylenie standardowe jako niepewność standardowa związana z tą estymatą. Omawia algorytm postępowania z uwzględnieniem liczby prób Monte Carlo (każda z nich to pojedyncza realizacja modelu pomiaru), umożliwiającą osiągnięcie założonej dokładności obliczeniowej przedziału rozszerzenia. Przyjmuje dwie koncepcje przedziału rozszerzenia: symetrycznego

probabilistycznie i najkrótszego dla założonego prawdopodobieństwa. Dokument ponadto opisuje procedurę walidacyjną wyznaczania niepewności pomiaru metodami analitycznymi przy użyciu symulacji Monte Carlo.

Rozszerzającym powyższe podejście jest Suplement 2 do Przewodnika. Dokument dotyczy wielowymiarowego modelu pomiaru, czyli takiego w którym występuje dowolna liczba wielkości wyjściowych, nazywanych menzurandem wektorowym. Wielkości te są wzajemnie skorelowane, gdyż zależą od tych samych wielkości wejściowych. Dokument przedstawia prawo propagacji niepewności w postaci macierzowej. Uogólnia też zastosowanie metody Monte Carlo w celu numerycznego wyznaczania wspólnego rozkładu prawdopodobieństwa dla wielkości wyjściowej wielowymiarowego modelu pomiaru. Na ich podstawie można wyznaczyć obszar rozszerzenia, będący odpowiednikiem przedziału rozszerzenia dla jednowymiarowego modelu pomiaru, który odpowiada określonemu prawdopodobieństwu. Obszar ten może przybierać postać hiperelipsy lub hiperprostokąta. Dokument również przedstawia procedurę obliczeniową wyznaczania najmniejszego obszaru rozszerzenia.

Z kolei istotnym ukłonem w kierunku metrologii prawnej jest Przewodnik omawiający rolę niepewności przy ocenie zgodności. Przy ocenie zgodności wynik pomiaru służy do podjęcia decyzji, czy przyrząd pomiarowy jest zgodny z określonym wymaganiem dotyczącym jego dokładności. Wymaganie to zazwyczaj przyjmuje postać jednej lub dwóch granic tolerancji, które definiują przedział dopuszczalnych wartości, zwany przedziałem tolerancji mierzalnej właściwości. Jeśli zmierzona wartość właściwości mieści się w przedziale tolerancji, mówi się, że jest zgodna z wymaganiami. Definiując przedział akceptacji dopuszczalnych zmierzonych wartości menzurandu, można zbilansować ryzyko błędnych decyzji akceptacji/odrzućenia związanych z niepewnością pomiaru w taki sposób, aby zminimalizować koszty związane z takimi błędnymi decyzjami. Dokument dotyczy problemu technicznego obliczania prawdopodobieństwa zgodności oraz prawdopodobieństw dwóch typów błędnych decyzji, biorąc pod uwagę funkcję gęstości prawdopodobieństwa menzurandu, granice tolerancji i granice przedziału akceptacji.

Ostatnim z wymienionych Przewodników jest dokument dotyczący modelowego podejścia przy opracowaniu danych pomiarowych. Model pomiaru to zależność matematyczna pomiędzy wszystkimi wielkościami, o których wiadomo, że były uwzględnione w pomiarze. Jego najczęstszą postacią jest funkcja pomiaru, która w jawny sposób przedstawia relacje pomiędzy wielkością wyjściową a wielkościami wejściowymi i której wartość, gdy zostaje obliczona przy wykorzystaniu znanych wartości wielkości wejściowych w modelu pomiaru, jest zmierzoną wartością menzurandu. Najczęściej przedstawiana jest w różnych zapisach metrologicznych jako równanie pomiaru uwzględniające najważniejsze wielkości wpływające na menzurand.

Model pomiaru umożliwia opracowanie wyniku pomiaru, gdyż służy do wyznaczenia wartości menzurandu i związanej z nim niepewności. Można powiedzieć, że we współczesnej metrologii bez modelu pomiaru niemożliwym jest otrzymanie poprawnego i wiarygodnego wyniku, gdyż umożliwia on uwzględnienie wszystkich możliwych do oszacowania oddziaływań na wielkość mierzoną. Na podstawie modelu pomiaru dokonuje się proces propagacji niepewności, bądź

bezpośrednio z równania niepewności pomiaru, bądź pośrednio z równania pomiaru poprzez propagację rozkładów realizowaną np. przy użyciu metody Monte Carlo. Dlatego dokument koncentruje się na sposobach opracowania modelu pomiaru i jego praktycznego wykorzystania.

Model pomiaru może przybierać różne formy: teoretyczną, empiryczną lub hybrydową. Może charakteryzować się jedną lub wieloma wielkościami wyjściowymi (taki zbiór wielkości wyjściowych wyrażany jest w postaci macierzy jednokolumnowej i nazywany wielkością wyjściową wektorową). Wielkość wyjściowa może być wyrażona bezpośrednio w funkcji wielkości wejściowych lub w sposób pośredni. Wielkości w modelu pomiaru mogą przyjmować wartości rzeczywiste lub zespolone. Modele te mogą być wielostopniowe, gdy wielkości wejściowe jednego stopnia są wielkościami wyjściowymi pochodzącymi z poprzedniego stopnia. Modele mogą opisywać szeregi czasowe obserwacji, w tym dryf czy pomiary dynamiczne. Model pomiaru może również przybrać postać modelu statystycznego.

Dokument wyjaśnia, w jaki sposób uwzględnić w modelu pomiaru dane dotyczące wielkości. Wielkości te odnoszą się do zjawiska lub zjawisk, na których opiera się pomiar, do oddziaływań powstających podczas wykonywania pomiaru oraz do interakcji z artefaktem lub próbką podlegającą pomiarowi.

Powyższe dokumenty wyznaczają podstawowy kanon opracowania danych pomiarowych, w myśl kształtującej się współcześnie koncepcji metrologicznej. Celem ich jest bowiem wypracowanie wspólnej metodyki opracowania wyniku pomiaru, jednolitej dla całego obszaru zastosowań metrologicznych.

Przewodniki ustalają ogólne zasady obliczania i wyrażania niepewności pomiaru, które mogą znaleźć zastosowanie przy opracowywaniu wyników pomiarów o dowolnej dokładności i we wszystkich dziedzinach, od pomiarów handlowych do pomiarów naukowych w badaniach podstawowych. Są pakietem stworzonym przez międzynarodową wspólnotę metrologiczną. Wychodzą naprzeciw powszechnemu oczekiwaniu dotyczącemu ujednoczeniu zasad opracowania danych pomiarowych i przedstawienia wyniku pomiaru w uzgodnionej postaci. Ma to istotne znaczenie dla zapewnienia spójności pomiarowej w skali globalnej. Zasady postępowania przedstawione w Przewodnikach są przeznaczone do stosowania w szerokim zakresie pomiarów, a w szczególności do pomiarów niezbędnych przy: kontroli i sterowaniu jakością w produkcji, przestrzeganiu i wprowadzaniu zarządzeń i przepisów, prowadzeniu badań podstawowych i wdrożeniowych oraz wykorzystywaniu ich wyników w nauce i technice, wzorcowaniu przyrządów pomiarowych i w ten sposób zapewnieniu spójności pomiarowej oraz rozwijaniu, utrzymywaniu i porównywaniu wzorców międzynarodowych i państwowych, z materiałami odniesienia włącznie.

Przedstawiona w Przewodnikach metoda obliczania i wyrażania niepewności wyniku pomiaru jest uniwersalna, czyli może być stosowalna do wszystkich rodzajów pomiarów i do wszystkich typów danych wejściowych używanych w pomiarach. Wyznaczona niepewność pomiaru ma charakter wewnętrznie spójny, czyli zbudowana jest z szeregu składowych i niezależna od sposobu pogrupowania tych składowych oraz jest przechodnia, czyli możliwa do bezpośredniego zastoso-

wania jako składowa przy obliczaniu niepewności kolejnego pomiaru, w którym wykorzystywany jest jej wynik.

Ujednoczenie zasad obliczania i wyrażania niepewności pomiaru umożliwia jednoznaczna interpretację wyników pomiarów wykonywanych w różnych miejscach i w różnym czasie na całym świecie. Jest to szczególnie istotne w pracy laboratoriów pomiarowych, a także ma istotne znaczenie dla wszystkich eksperymentatorów, którzy korzystają z wyników pomiarów wykonanych przez innych i którzy chcą, aby ich wyniki były też wykorzystywane. Uzgodnienie, w skali światowej, podejścia do obliczania i wyrażania niepewności pomiaru umożliwia pełne zrozumienie i właściwą interpretację wyników pomiarów wykonywanych w nauce, technice, handlu i przemyśle. Pozwala także na łatwe ich porównywanie. Można zaryzykować twierdzenie, że Przewodniki dotyczące wyrażania niepewności pomiaru stały się, obok spójnego układu jednostek miar SI, fundamentalnym dokonaniem metrologii.

Przedstawione podejście w Przewodnikach dotyczące opracowania danych pomiarowych czerpie bogato z tradycji myśli matematycznej, która kształtowała się na przestrzeni ostatnich stuleci. Jego prekursorami byli najznamienitsi twórcy w dziedzinie nauk ścisłych. Podejście to wyrasta z klasycznej teorii błędu pomiaru, opierając się o rachunek zmiennych losowych, współcześnie realizowany już przy użyciu numerycznych metod obliczeniowych wspieranych przez powszechnie dostępne techniki komputerowe. Przeszło drogę ewolucyjną, od wyobrażenia krzywej błędu jako pierwotnej postaci zmiennej losowej do dojrzałej, w postaci menzurandu formowanego poprzez model pomiaru. Jest uniwersalną propozycją w dziedzinie opracowania danych, mogących mieć zastosowanie we wszystkich obszarach nauk technicznych. Stanowi istotny wkład metrologii do rozwoju tych nauk.

Należy dodać, że Przewodniki wydawane są przez Międzynarodowe Biuro Miar i udostępniane na stronie internetowej BIPM. Firmowane są przez Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii (JCGM), działający pod przewodnictwem dyrektora BIPM od 1997 roku. Obecnie Komitet JCGM tworzą przedstawiciele Międzynarodowego Biura Miar (BIPM), Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej (ISO), Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej (OIML), Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC), Międzynarodowej Federacji Chemii Klinicznej i Medycyny Laboratoryjnej (IFCC), Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC), Międzynarodowej Unii Fizyki Teoretycznej i Stosowanej (IUPAP) oraz Międzynarodowej Współpracy w zakresie Akredytacji Laboratoriów (ILAC).