

## Podejścia związane z wyrażaniem niepewności pomiaru

Na przestrzeni ostatnich lat nastąpiły zmiany w dziedzinie wyrażania niepewności pomiaru. Zaowocowało to koniecznością wprowadzenia szeregu nowych terminów związanych z wyrażaniem niepewności, co znalazło odzwierciedlenie w najnowszym słowniku metrologicznym, w trzeciej edycji VIM (*International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*). We wstępie do tego dzieła autorzy podkreślają dwa podejścia, jedno związane z tradycyjną koncepcją opartą na statystycznej analizie błędu pomiaru (*Error Approach, Traditional Approach* lub *True Value Approach*), drugie związane z teorią niepewności opartą na probabilistycznej metodzie propagacji rozkładów (*Uncertainty Approach*).

Oba podejścia przyjmują założenie o wyznaczaniu niepewności pomiaru na podstawie rozkładu związanego z wynikiem pomiaru, lecz w pierwszym przypadku jest to rozkład o charakterze statystycznym, a w drugim o charakterze probabilistycznym. Różnica pomiędzy tymi rozkładami polega na tym, iż w przypadku rozkładu statystycznego jego parametry są zmiennymi losowymi, a w przypadku rozkładu probabilistycznego parametry są liczbami stałymi. W pierwszym wypadku mamy do czynienia z zagadnieniem zmienności tych parametrów; w drugim przypadku taka sytuacja jest wyeliminowana, ponieważ wyznaczone parametry pozbawione są wewnętrznej niepewności. Aby odróżnić oba podejścia zaproponowano zróżnicowanie terminologiczne dotyczące wyrażania niepewności w obu sytuacjach. Szczególnie dotyczy to takich pojęć jak przedział ufności (*confidence interval*) i przedział rozszerzenia (*coverage interval*) oraz poziom ufności (*confidence level*) i prawdopodobieństwo rozszerzenia (*coverage probability*). Terminy przedział ufności i poziom ufności związane są z rozkładem statystycznym (otrzymanym na podstawie serii obserwacji), a pojęcia: przedział rozszerzenia i prawdopodobieństwo rozszerzenia z rozkładem probabilistycznym (otrzymywanym metodą propagacji rozkładów wielkości wejściowych poprzez model matematyczny wielkości wyjściowej). O ile pojęcia związane z rozkładem statystycznym (zmiennej losowej związanej z ograniczoną liczebnie serią obserwacji) są dobrze znane w krajowej literaturze naukowej, o tyle pojęcia związane z rozkładem probabilistycznym (zmiennej losowej ciągłej lub dyskretnej związanej z populacją) są pojęciami nowymi. Językowo nawiązują do terminu współczynnik rozszerzenia (*coverage factor*), z założeniem, że w tym kontekście słowo *coverage* można tłumaczyć jako *rozszerzenie*. Należy w tym miejscu dodać, że w dokumentach krajowych pojęcie *coverage interval* występuje również pod nazwą przedział objęcia [Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. GUM 1999] lub przedział pokrycia [PN-ISO 3534-1].

W pierwszym podejściu zakłada się istnienie hipotetycznej, pojedynczej lecz niepoznawalnej wartości prawdziwej związanej z wielkością mierzoną. Celem analizy jest wyznaczenie przedziału ufności zawierającego z określonym prawdopodobieństwem tę hipotetyczną wartość. Przedział buduje się wokół wartości średniej otrzymanej na podstawie serii obserwacji. Zakłada się przy tym, że wszystkie obserwacje wywodzą się z populacji o rozkładzie normalnym.

W tym miejscu należy dodać, iż historycznie zagadnienie wartości prawdziwej związanej z wynikiem pomiaru pojawia się w pracach prekursorów współczesnej metrologii. Już w XVIII wieku uświadomiono sobie, że żaden wynik pomiaru nie będzie zgodny z domniemaną wartością prawdziwą. Przy każdym pojedynczym pomiarze popełnia się pewien błąd wynikający z losowości odczytu wartości obserwacji. Pozostaje zatem zawsze pewna nieznaną różnica pomiędzy wartością obserwacji i jej wartością prawdziwą. Jednym z pierwszych myślicieli, który zastanawiał się na kwestię rozkładu dla tej przypadkowej różnicy, czyli błędu pomiaru, był Thomas Simpson (1710 – 1761). W 1757 roku zastanawiając się nad kształtem krzywej błędu pomiaru wywnioskował, że jeżeli błąd zawiera się w granicach określonego odcinka, to wyniki pomiaru powinny się powtarzać proporcjonalnie do ciągu liczbowego: 1, 2, ...,  $n$ , ..., 2, 1, przyjmując wartości w obrębie tego przedziału. Było to pierwsze w historii wyobrażenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa błędu pomiaru, w postaci dyskretnej. Jak można się łatwo domyśleć miała ona postać trójkąta równoramiennego, dlatego rozkład trójkątny często nazywany jest rozkładem Simpsona. Zagadnieniem rozkładu dla błędu pomiaru zajmował się również Pierre Simon Laplace (1749 – 1827). W latach siedemdziesiątych XVIII stulecia formułuje on trzy warunki dotyczące krzywej (rozkładu) błędu: (1) symetryczna względem wartości prawdziwej; (2) dąży do zera oddalając się od wartości prawdziwej; (3) obszar (pole powierzchni pod krzywą błędu) jest równy jeden. W 1777 roku stawia wniosek, że krzywa rozkładu błędu opisana jest funkcją logarytmiczną, lecz w roku 1810 poprawia swoje wnioskowanie na rzecz krzywej dzwonowej, formułując tezę centralnego twierdzenia granicznego i przyznając tym samym rację propozycji Carla Friedricha Gaussa (1777 – 1855) z 1809 roku.

Drugie podejście (*Uncertainty Approach*) nie przyjmuje założenia o istnieniu hipotetycznej, pojedynczej wartości prawdziwej, ale traktuje każdą wartość, którą można przypisać wielkości mierzonej jako jej wartość prawdziwą. W związku z powyższym każdej wielkości można przypisać określony zbiór możliwych wartości. Zbiór taki można wyznaczyć i przedstawić w postaci rozkładu prawdopodobieństwa. Obliczenia wykonuje się metodą propagacji rozkładów przypisanych wielkościom wejściowym poprzez model matematyczny wielkości wyjściowej. Propagację można realizować metodą Monte Carlo, a w przypadku modeli linowych (na ogół dla pomiarów bezpośrednich lub pośrednich linearyzowanych) również przy użyciu operacji splotu matematycznego. Miarą niepewności pomiaru jest długość przedziału rozszerzenia rozkładu wyjściowego, obliczana dla określonego prawdopodobieństwa rozszerzenia, na ogół równego 95 %. Koncepcja ta znajduje wyraz w nowym dokumencie dotyczącym wyrażania niepewności pomiaru: JCGM 101:2008, wydanym przez Międzynarodowe Biuro Miar.

Obok koncepcji *Uncertainty Approach* we współczesnej literaturze metrologicznej dyskutowana jest metodyka bayesianska opracowania danych pomiarowych. Podejście to opiera się na twierdzeniu Thomasa Bayesa (1702 – 1761) o prawdopodobieństwie warunkowym. Teoria prawdopodobieństwa warunkowego pozwala na łączenie informacji o wielkości mierzonej pochodzącej spoza pomiaru z danymi pomiarowymi. Wiedza o wielkości mierzonej nigdy nie jest kompletna, ale można ją jedynie przybliżyć łącząc ze sobą informacje różnej natury. Koncepcja powyższa sprowadza się do tezy, że rozkład prawdopodobieństwa wielkości mierzonej, w postaci zbioru możliwych dla niej wartości, powstały w oparciu o dostępną wiedzę, aktualizowany jest na podstawie informacji dostarczanych przez dane pomiarowe. Ideę takiego podejścia wyraża projekt dokumentu *Supplement to the Guide*

– *Concepts and basic principles* z 2006 roku. W tym miejscu można zauważyć, że historia zatacza koło, gdyż początki zagadnień związanych z niepewnością pomiaru należy wiązać z postaciami wspomnianych już matematyków, Thomasa Simpsona i Thomasa Bayesa.

Generalnie, zagadnienia związane z niepewnością pomiaru znajdują coraz więcej miejsca w międzynarodowej literaturze metrologicznej, stając się powoli wiodącą problematyką teoretyczną. Świadczy o tym stale rosnąca liczba publikacji dotycząca tych zagadnień. Tylko w latach 2006 – 2008, w takich czasopismach jak „Metrologia”, „Measurement Science and Technology” oraz „Measurement” opublikowanych zostało około 200 artykułów poświęconych problematyce niepewności pomiaru. Wiodącą rolę odgrywa tu czasopismo „Metrologia” z liczbą znacznie przekraczającą 100 publikacji na powyższy temat. Należy dodać, że czasopismo to ma najwyższy wskaźnik liczby cytowań (*impact factor*) z wymienionych trzech periodyków, co świadczy o stale rosnącym zainteresowaniu teoretyczną problematyką metrologii w całej literaturze naukowej.

Poza licznymi artykułami, w ostatnich latach wydanych zostało prawie 20 książek naukowych i ponad 10 przewodników (dostępnych również w wersji elektronicznej na stronach internetowych takich instytucji jak BIPM, OIML, NIST, EURACHEM czy EA) dotyczących wyrażania niepewności pomiaru. Zbiór ten tworzy pokaźny międzynarodowy dorobek w dziedzinie metrologii.

*Paweł Fotowicz*