

# Informacja o rozprawie doktorskiej

## Analityczna metoda obliczania niepewności pomiaru i jej zastosowanie przy opracowaniu wyników pomiaru małych średnic zewnętrznych laserowym przyrządem skanującym

Praca przedstawia analityczną metodę obliczania niepewności pomiaru, służącą do 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 w stosunku do zalecanej tam numerycznej metody odniesienia (Monte Carlo), gdy mamy do czynienia z liniowym lub linearyzowanym modelem pomiaru. Metoda analityczna 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 odniesienia, a jej błąd obliczeniowy jest o rząd wielkości mniejszy od stosowanej w praktyce metody Welch-Satterthwaite'a. Pozwala na wyznaczanie niepewności rozszerzonej dla prawdopodobieństwa 95 % z zachowaniem wiarygodności drugiej cyfry znaczącej. Jest zatem pod tym względem bardziej efektywna od innych sposobów obliczania niepewności pomiaru proponowanych w literaturze.

Metoda analityczna powstała jako technika obliczeniowa służąca do realizacji postulatów, dotyczącego wyznaczania współczynnika rozszerzenia w procedurach szacowania niepewności pomiaru przy wzorcowaniu, wyrażonego w dokumencie EA-4/02. Postulat ten mówi o konieczności wyznaczania współczynnika rozszerzenia dla prawdopodobieństwa 95 % na podstawie rzeczywistego rozkładu prawdopodobieństwa estymaty wielkości wyjściowej. Przy czym przez rzeczywisty można rozumieć rozkład powstały w wyniku złożenia rozkładów przypisanych poszczególnym wielkościom wejściowym. Matematyczne modele pomiaru stosowane przy wzorcowaniu to równania liniowe lub linearyzowane, gdzie wielkości wejściowe traktowane są na ogół jako zmienne losowe niezależne. Stwarza to warunki do zastosowania operacji splotu matematycznego do wyznaczania rzeczywistego rozkładu dla wielkości wyjściowej i obliczania współczynnika rozszerzenia jako kwantyla tego rozkładu dla określonego prawdopodobieństwa rozszerzenia. Rozwiązanie to jest szczególnie przydatne przy podawaniu powyższego współczynnika w świadectwach wzorcowania. Ponieważ zagadnienie to dotyczyło głównie pomiarów związanych zapewnieniem spójności pomiarowej, to metoda została pierwotnie opublikowana w „OIML Bulletin”, biuletynie Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej. Następnie przedstawiono ją w czasopiśmie naukowym „Measurement”. W tym czasie toczyła się międzynarodowa dyskusja dotycząca wyrażania niepewności pomiaru w postaci przedziału rozszerzenia, wyznaczanego metodą propagacji rozkładów wielkości wejściowych na podstawie modelu matematycznego dla wielkości wyjściowej. Wraz z przyjęciem nowych rozwiązań w tej dziedzinie została zaproponowana analityczna metoda obliczenia samego przedziału rozszerzenia i opublikowana w czasopiśmie „Metrologia”, redagowanym przez Międzynarodowe Biuro Miar.

Przedmiotem analizy metrologicznej były wyniki uzyskane przy pomiarze średnicy laserowym przyrządem skanującym. Wyniki te wskazywały, że w przypadku stabilnego i powtarzalnego pomiaru wielkości mierzonej składowa przypadkowa wpływa w niewielkim stopniu na niepewność pomiaru. Znacznie większą rolę odgrywa rozdzielczość pomiaru, a przede wszystkim błąd systematyczny pomiaru.

Cechą dobrze wykonywanego pomiaru jest wysoka powtarzalność obserwacji. Powoduje to, że rozrzut wyników nie ma decydującego udziału w niepewności, a jej wartość może być znacznie większa, niż to wynika z analizy statystycznej danych pomiarowych. Tak właśnie jest w przypadku pomiaru średnicy laserowym przyrządem skanującym.

Przyrządy powyższe, zwane również skanerami pomiarowymi, wykorzystuje się do bezstykowych pomiarów poprzecznych wymiarów zewnętrznych elementów maszynowych, takich jak wałki, druty czy włókna. Zasada ich działania polega na pomiarze czasu przesłonięcia wiązki promienia laserowego przemiatanego wzdłuż mierzonego wymiaru. Ze względu na bezstykowość, szybkość i częstotliwość pomiaru chętnie stosowane są w przemyśle, szczególnie na liniach produkcyjnych lub przy kontroli jakości tych elementów, gdyż mierzony obiekt może przemieszczać się w trakcie pomiaru w określonym obszarze pomiarowym. Ich zaletą jest również to, że z powodu nieskomplikowanej budowy, są odporne na zakłócenia i koszt ich wykonania jest stosunkowo niewysoki.

Skanery pomiarowe były konstruowane i wykonywane w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej na zamówienie zewnętrznych zleceńodawców przemysłu krajowego, przy dużym udziale autora niniejszej rozprawy. Powstało szereg urządzeń pomiarowych, najczęściej wykorzystywanych do pomiaru średnic włókien światłowodowych i kalibrowanych drutów, na ogół w warunkach produkcyjnych, w przemyśle optycznym i elektronicznym. Działaniom tym towarzyszyło uzyskanie dużej ilości wiarygodnych danych pomiarowych, otrzymanych w wyniku długotrwałych prac badawczych. Umożliwiły one rozpoznanie przyczyn wpływających na niepewność pomiaru, której główną składową jest błąd systematyczny. Błąd ten powstaje na skutek przemieszczania się obiektu mierzonego wewnątrz obszaru pomiarowego. Ponieważ nie jest znane położenie elementu, możliwa jest jego dowolna pozycja w obrębie tego obszaru z założeniem jednakowego prawdopodobieństwa. Założenie to przyjęto ze względu na brak podstaw do wyróżnienia uprzywilejowanej pozycji mierzonego obiektu wewnątrz tego obszaru.

Błąd systematyczny traktowany jest probabilistycznie jako składowa przedziału rozszerzenia. Jego wartość graniczna została oszacowana na podstawie wykonanej analizy matematycznej, przeprowadzonej w oparciu o rozpoznane zjawiska związane z pomiarem, przy wykorzystaniu zasad i rozwiązań z dziedziny optyki laserów. W pracy porównano obliczone wartości graniczne z wartościami błędu systematycznego otrzymanymi na podstawie danych eksperymentalnych. Odpowiednie wartości doświadczalne mieszczą się w wyznaczonych przedziałach rozszerzenia, co świadczy o poprawnym modelowaniu tego błędu.

Przy obliczeniach zastosowano procedurę dotychczas wykorzystywaną jedynie do opracowania wyników pomiaru przy wzorcowaniu. W rozprawie doktorskiej procedura ta została adoptowana do potrzeb dowolnego pomiaru bezpośredniego. Stanowi ona przejrzystą metodę opracowania wyniku pomiaru z uwzględnieniem budżetowania zasadniczych składowych niepewności.

Rozprawa stawia tezy naukowe związane zarówno z oceną dokładności samej metody analitycznej, jak i jej zastosowaniem w analizie niepewności pomiaru uzyskanego przy

użyciu laserowego przyrządu skanującego. Tezy te prowadzą do dalej idącego wniosku, że analityczną metodę obliczania niepewności można zastosować w celu praktycznego opracowania wyniku pomiaru bezpośredniego, szczególnie gdy mamy do czynienia ze znaczącym i zmiennym błędem systematycznym. Wynik takich obliczeń uświadamia, że błąd systematyczny może być dominującą i zmienną składową budżetu niepewności pomiaru, w sytuacji gdy składowa przypadkowa podlega znacznie mniejszym zmianom i wnosi niewielki udział do niepewności wynikowej. Udział ten może być znacznie większy z tytułu rozdzielczości wskazań, szczególnie gdy wyniki obserwacji są powtarzalne. Świadczy to o tym, że sama analiza statystyczna serii obserwacji nie wystarcza do obiektywnej oceny niepewności i musi być uzupełniona przez dodatkowe analizy oparte na wiedzy dotyczącej samego pomiaru. Ta metodyka postępowania jest obecnie podstawą oceny niedokładności pomiaru, stosowaną coraz powszechniej we współczesnej metrologii.

*Paweł Fotowicz*