

Omówienie Przewodnika JCGM GUM-6:2020 dotyczącego podejścia modelowego przy wyznaczaniu niepewności pomiaru

Description of the JCGM GUM-6: 2020 Guide concerning the use of the measurement models in evaluation of measurement uncertainty

Paweł Fotowicz
Główny Urząd Miar

W artykule omówiono podstawowe zasady tworzenia modeli pomiaru przedstawione w nowym dokumencie opublikowanym przez Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii. Celem jest przybliżenie głównych treści w nim zawartych. Dokument jest ważnym materiałem, który może być wykorzystywany w laboratoriach badawczych, wzorcujących i naukowych.

The article discusses the basic principles for creating the measurement models presented in a new document published by the Joint Committee for Guides in Metrology. The aim of the article is description of the main ideas expressing in this Guide. The document is an important material that can be used in testing, calibration and scientific laboratories.

Słowa kluczowe: niepewność pomiaru, model pomiaru, przewodnik
Keywords: measurement uncertainty, measurement model, guide

Wstęp

W 2020 roku na stronie internetowej Międzynarodowego Biura Miar ukazał się już szósty, kolejny Przewodnik dotyczący wyrażania niepewności pomiaru [1]. Opublikowany dokument JCGM GUM-6:2020 *Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models* przedstawia podejście modelowe przy wyznaczaniu niepewności pomiaru. Jest naturalną kontynuacją problematyki zawartej w poprzednich pięciu Przewodnikach [2-6], z których dwa były już omawiane na łamach Biuletynu GUM w latach ubiegłych [7 i 8], a pierwszy i podstawowy z nich został opublikowany w polskiej wersji językowej na stronie internetowej Głównego Urzędu Miar [9]. Głównym celem tego dokumentu jest przedstawienie sposobów opracowania modelu pomiaru służącego do opisywania menzurandu, jako wielkości która ma być zmierzona [10], a więc podstawowego obiektu którym zajmuje się każdy metrolog.

W celu lepszego przybliżenia treści omawianego Przewodnika w artykule wykorzystano obszernie i najważniejsze jego fragmenty.

Model pomiaru

Model pomiaru to zależność matematyczna pomiędzy wszystkimi wielkościami, o których wiadomo, że były uwzględnione w pomiarze [10]. 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.

W omawianym dokumencie używana jest przede wszystkim ta najbardziej ogólna nazwa, czyli model pomiaru. Należy pamiętać, że każdy model pomiaru jest również funkcją pomiaru, tak jak każda funkcja pomiaru jest równaniem pomiaru, lecz odwrotna relacja nie zawsze istnieje. Przez równanie pomiaru na ogół rozumiemy linearyzowaną lub liniową funkcję pomiaru, najczęściej przedstawianą w postaci addytywnej. Często jest to też najdogodniejsza dla metrologa postać modelu pomiaru.

Model pomiaru umożliwia opracowanie wyniku pomiaru, gdyż służy do wyznaczenia wartości mierzand 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 i jego praktycznego wykorzystania.

Jak twierdzą autorzy dokumentu model pomiaru może przybierać różne formy: teoretyczną lub empiryczną albo hybrydową (częściowo teoretyczną i częściowo empiryczną). 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. W tym dokumencie pojęcie *model pomiaru* jest rozumiane w tym szerokim znaczeniu.

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.

Podczas korzystania z modelu pomiaru mogą pojawić się problemy numeryczne. Pokazano jak często takie problemy można złagodzić przedstawiając model w inny sposób, aby dobrze sprawdzał się przy obliczeniach. Pokazano również jak można czasami zastosować reformułowanie modelu w celu wyeliminowania niektórych skutków korelacji zachodzących pomiędzy wielkościami wejściowymi, gdy takie zależności mogą zaistnieć.

Podstawowe zasady

Obiektem zainteresowania metrologicznego jest mierzand. Jak wspomniano we wstępie mierzand to wielkość, która ma być zmierzona, określana też jako wielkość wyjściowa w modelu pomiaru [3]. W wielu przypadkach

nie jest on mierzony bezpośrednio, ale jest określany pośrednio na podstawie innych wielkości, z którymi powiązany jest przez model pomiaru. Wiele pomiarów jest modelowanych przez zależność funkcyjną między wielkościami wejściowymi o wartościach rzeczywistych i pojedynczą wielkość wyjściową. Ta prosta forma nazywana jest rzeczywistym, jawnym i jednowymiarowym modelem pomiaru. Rzeczywistym, ponieważ wszystkie zawarte w nim wielkości przyjmują wartości rzeczywiste (a nie zespolone) i jawnym, ponieważ wartości wielkości wyjściowej można obliczyć bezpośrednio przy danych wartościach wejściowych oraz jednowymiarowym, ponieważ wielkość wyjściowa jest pojedynczą wielkością skalarną. Jednak nie dotyczy to wszystkich pomiarów. Model pomiaru może być złożony i wielowymiarowy, gdy istnieje więcej niż jeden mierzand (mierzand wektorowy).

Proces opracowania modelu pomiaru można podzielić na etapy, do których należą: zdefiniowanie mierzand, zamodelowanie pomiaru poprzez wybór odpowiedniej postaci matematycznej oraz określenie oddziaływań związanych z pomiarem i uwzględnienie ich w modelu podstawowym. Występujące wielkości w modelu są zmiennymi losowymi, których rozkłady prawdopodobieństwa opisują dostępną o nich wiedzę. Dlatego też model pomiaru można również uznać za model obejmujący zmienne losowe, podlegający regułom statystyki matematycznej. Podczas tworzenia modelu pomiaru, odpowiedniego dla celu zastosowania, należy wziąć pod uwagę wszystkie znane oddziaływania wpływające na wynik pomiaru. Pominięcie określonego udziału może prowadzić do nierealistycznie małej niepewności związanej z wartością mierzand.

Zasada pomiaru umożliwia ustalenie podstawowego modelu, często opartego na prawie naukowym. Z zasady pomiaru wynika zbiór wielkości wejściowych, czyli wielkości występujących w modelu w następstwie tych praw.

Opracowując model pomiaru, należy wziąć pod uwagę zakresy możliwych wartości wielkości wejściowych i wyjściowych. Model powinien zapewnić wiarygodne estymaty i związane z nimi niepewności dla wszystkich wielkości wyjściowych w wymaganych zakresach, które zostały właściwie dobrane. Model pomiaru powinien być stosowany tylko w tych zakresach wielkości, dla których został opracowany.

Większość modeli pomiarowych jest hybrydowych, to znaczy łączą aspekty modeli teoretycznych i empirycznych. Nawet jeśli cała zasada pomiaru opiera się na teorii naukowej, w pomiarze często występują wielkości, które należy uwzględnić i modelować empirycznie.

Wiele modeli teoretycznych stosowanych w różnych dziedzinach pomiarowych jest formułowanych w postaci równań różniczkowych. W niektórych przypadkach

równanie różniczkowe służy jedynie jako podstawa do tworzenia prostszych modeli. W modelach pomiaru, które obejmują równania różniczkowe, mierzand jest zwykle funkcją współczynników w tych równaniach. Współczynniki te są szacowane na podstawie danych empirycznych, zwykle przy zastosowaniu metody statystycznej. Równania te są rozwiązywane zwykle przy użyciu metod numerycznych, a do wyznaczania niepewności stosuje się wówczas metodę Monte Carlo.

Model pomiaru powinien umożliwiać uwzględnienie wszystkich istotnych i dostępnych informacji. Przy wyborze formy modelu należy brać pod uwagę poniższe aspekty.

- *Dostępność rzetelnej postaci teoretycznej.* Należy wziąć pod uwagę zakres, w jakim model może opierać się na zasadzie pomiaru, zwykle ugruntowanym prawie naukowym. Model oparty na rzetelnej podstawie naukowej będzie prawdopodobnie wymagał mniej pracy w celu sprawdzenia jego adekwatności niż model empiryczny lub hybrydowy.
- *Niepewność pomiaru docelowa.* Wpływa na odpowiedni stopień przybliżenia, a także na liczbę uwzględnionych korekcyjnych, branych pod uwagę.
- *Prostota.* Istotą jest, aby opracować model, który można implementować przy minimalnym wysiłku. Prostsze jego postaci mogą również pomóc przy unikaniu błędów przy zastosowaniu. W tym względzie przydatne może być wykorzystanie podmodeli.
- *Zakres pomiaru.* Model powinien mieć zastosowanie w całym zakresie wartości wielkości wejściowych i wyjściowych, w odniesieniu do których ma być użyty. Właściwe może być podzielenie zakresu na podzakresy, w każdym z których obowiązuje inny model.
- *Dominujące źródła niepewności.* Tam gdzie dominujące niepewności wynikają z pomiaru wielkości wejściowych, najbardziej odpowiednie są modele, które wiążą niepewności z wielkościami wejściowymi. Tam gdzie dominujące niepewności odnoszą się do nieprzewidywalnych lub losowych odchyłeń w obserwacjach, zazwyczaj bardziej odpowiednie są modele uwzględniające dane wykonawcze.
- *Stosowność.* Model który generuje wartości współczynników lub parametrów, które mogą być interpretowane w kategoriach wielkości fizycznych, może być łatwiejszy do zastosowania przez użytkowników niż model, który dla prostoty matematycznej wykorzystuje abstrakcyjne funkcje wielkości fizycznych.
- *Oszczędność.* Jeśli model statystyczny jest dopasowany do danych, model nie powinien zawierać więcej członów niż jest to konieczne. Ten aspekt jest często uwzględniany w procesie statystycznego wyboru modelu.

- *Dostępne informacje.* Dostępność wyczerpujących danych na temat wykonania procedury pomiarowej pozwala na zastosowanie uproszczonych modeli pomiaru.
- *Dokładność numeryczna.* Model powinien być numerycznie jak najbardziej „dobrze ułożony”, to znaczy nie powinien mieć negatywnego wpływu na ograniczenia dostępnej precyzji obliczeniowej.
- *Stabilność rozwiązania.* Niektóre modele wymagające rozwiązania numerycznego mogą prowadzić do niestabilnej wydajności numerycznej. Preferowane są modele prowadzące do stabilnych rozwiązań.
- *Koszt obliczeniowy.* Modele, które są łatwiejsze do oceny lub rozwiązania z odpowiednią dokładnością, są często bardziej preferowane od tych, które mogą wymagać znacznego wysiłku obliczeniowego.

Nadrzędnym problemem jest to, czy model jest w stanie zapewnić prawidłową estymatę wielkości wraz ze związaną z nią niepewnością pomiaru. Gdy dostępna jest docelowa niepewność pomiaru, model powinien być w stanie dostarczyć zgodnych z nią wyników.

Należy rozważyć wybór najbardziej odpowiedniej postaci modelu, ponieważ różne modele mogą być odpowiednie do różnych celów. Przykładowo, przy wzorcowaniu, związek między zmienną odpowiedzi a zmienną odniesienia można często modelować za pomocą wielomianu niskiego stopnia, często linii prostej. W przypadkach gdy istnieje więcej niż jedna wielkość wyjściowa, model powinien być zwykle traktowany jako wielowymiarowy, a nie jako oddzielne modele jednowymiarowe, ponieważ często wymagana jest wiedza na temat kowariancji związanych z estymatami wielkości wyjściowych. Przypadki takie pojawiają się podczas określania obszarów rozszerzenia. Nieuwzględnianie kowariancji na ogół prowadzi do niewłaściwych ocen niepewności.

Dopasowanie modelu

W idealnym przypadku podstawowy model pomiaru powinien opisywać prawo naukowe lub związek dotyczący prawdziwych wartości wielkości wejściowych i wyjściowych. Zazwyczaj, w praktyce, model przedstawia jedynie wykonalne, dopasowane do celu przybliżenie idealnej zależności. Dzieje się tak dlatego, gdyż zależność ta może być zbyt skomplikowana lub niewygodna do praktycznego zastosowania. Alternatywnie, związek może być nieznanym, ale empiryczne przybliżenie może być wystarczające do zamierzonego celu. W niektórych przypadkach możliwe jest zastosowanie bliskiego przybliżenia idealnej zależności. Natomiast niewskazane jest wybieranie modelu wyłącznie dla wygody, gdy skutkuje to prostszą analizą lub dostępne jest oprogramowanie do jego realizacji. W wyjątkowych przypadkach przyjmuje

się, że analiza może być trudna lub oprogramowanie jest niedostępne albo trudne do opracowania. W przypadku zastosowania prostszego modelu pojawi się niepewność związana z estymatą mierzalną wynikająca z tego uproszczenia.

Przekształcenia modeli

Jeśli istnieje możliwość przekształcenia wyrażenia niejawnego w wyrażenie jawne, może istnieć preferowany wybór zależny od konkretnych okoliczności. Czasami preferowana jest postać niejawna, ponieważ może być korzystniejsza numerycznie niż postać jawna.

W wielu etapowych procesach metrologicznych wielkości z pomiarów pośrednich są wykorzystywane w kolejnych pomiarach. Każdy etap procesu można opisać za pomocą modelu pomiaru z wielkościami wejściowymi i wyjściowymi. Ten zbiór modeli stanowi wielostopniowy model pomiaru i może być używany jako taki. Cały proces można czasami wygodnie opisać za pomocą jednostopniowego modelu, nieraz obejmującego inną liczbę wielkości.

Modele wielostopniowe powstają również jako naturalna konsekwencja łańcucha spójności pomiarowej. Niekiedy, aby poprawnie oszacować niepewność związaną z estymatą wielkości wyjściowych na danym etapie, konieczne jest uwzględnienie poprzednich etapów w powiązaniu z obecnym. W efekcie może być konieczne rozważenie odpowiednich modeli pomiaru jako pojedynczego, wielostopniowego modelu. Przykładowo w pomiarach masy i siły pojawia się sytuacja, w której kowariancje między objętością a masą, na różnych etapach łańcucha spójności pomiarowej, muszą być brane pod uwagę w celu prawidłowej oceny wpływu korekcji w poru na niepewność związaną z estymatą wielkości wyjściowej przy wzorcowaniu. Wzorcowanie jest ważnym przykładem modelu wielostopniowego, w którym po określeniu funkcji wzorcowania następuje jej zastosowanie. Podział na etapy jest konieczny, gdy jedno laboratorium wyznacza funkcję wzorcowania, a inne ją stosuje. Gdy istnieje kilka parametrów wzorcowania, kowariancje parametrów, jak również ich niepewności standardowe, muszą być uwzględnione w następnym etapie. Łączenie etapów, gdy jest to możliwe, pozwala uniknąć konieczności uwzględniania kowariancji. Czasami zmiana zmiennych może spowodować alternatywne przedstawienie modelu, która pozwala pominąć te kowariancje.

Utrata dokładności numerycznej

Niedokładność może wystąpić w obliczeniach numerycznych w wyniku użycia formuły lub algorytmów, które są matematycznie poprawne, ale nie są odpowiednie dla danego zadania. Taka niedokładność może wystąpić

w wielu przypadkach, na przykład przy obliczaniu podstawowych statystyk, jak średnia czy odchylenie standardowe eksperymentalne. Konkretnie przyczyny takiego zachowania obejmują błędy numeryczne spowodowane utratą cyfr znaczących, wynikające z narastania błędu zaokrąglania.

Potrzeba oceny funkcji pomiaru podawanych w postaci wzoru matematycznego jest szeroko rozpowszechniona w metrologii. Formuły są podawane w dokumentach, raportach, procedurach, specyfikacjach, przewodnikach czy normach. Służą do wyrażania zarówno teoretycznych, jak i empirycznych związków między wielkościami. Metrologowie mają prawo oczekiwać, że formuła dana z sprawdzonego źródła jest odpowiednia do celu, dla którego została opracowana. Innymi słowy, formuła może być bezpośrednio obliczana lub implementowana numerycznie. Nie zawsze jest tak, że wierna realizacja danego wzoru daje wynik z oczekiwaną dokładnością numeryczną, zwłaszcza w porównaniu z zastosowaniem alternatywnych matematycznie równoważnych formuł. W niektórych przypadkach utrata dokładności numerycznej może być nie do zaakceptowania.

Często można zrekompensować utratę dokładności numerycznej, zwłaszcza jeśli przewiduje się, że może to mieć negatywny wpływ na obliczone wyniki. Ponowna parametryzacja wyrażenia matematycznego może, w niektórych przypadkach, znacznie poprawić dokładność obliczeniową ocenianego wyniku. Zalecane jest też korzystanie z dobrej jakości bibliotek oprogramowania matematycznego.

Rozpoznanie oddziaływań pochodzących z pomiaru

Identyfikacja oddziaływań pojawiających się przy praktycznej realizacji pomiaru jest jednym z najtrudniejszych zadań przy konstruowaniu modelu zgodnego z przeznaczeniem. Należy brać pod uwagę następujące oddziaływania dotyczące:

- realizacji specyfikacji mierzalnej,
- przybliżeń i założeń w modelowaniu pomiaru,
- warunków pomiaru,
- wpływów zewnętrznych (w tym środowiskowych),
- dryfu układu pomiarowego,
- wzorców pomiarowych i certyfikowanych materiałów odniesienia,
- artefaktów, przedmiotów lub materiałów, dla których ma zastosowanie wynik pomiaru,
- niestabilności lub niejednorodności artefaktów lub materiałów podlegających pomiarowi,
- próbkowania,
- przygotowania próbki,
- wzorcowania,

- odczytu analogowych i cyfrowych układów pomiarowych,
- rozdzielczości systemu lub progu dyskryminacji,
- zerowania przyrządu,
- różnic i korelacji między obserwacjami.

Zasadniczo wszystkie powyższe oddziaływania należy uwzględnić w modelu pomiaru. Istnieją różne sposoby rozszerzenia podstawowego modelu, aby uwzględnić określone oddziaływania. Celem opracowania podstawowego modelu pomiaru jest uzupełnienie go tak, aby stał się modelem obejmującym wszystkie wielkości i oddziaływania wpływające na wynik pomiaru. Oddziaływania należy opisać na tyle dobrze, aby można było je skorygować.

Oddziaływania wynikające z pomiaru można często opisać jako wpływ na jedną lub więcej wielkości wejściowych. W związku z tym właściwe jest modelowanie takich oddziaływań w odniesieniu do wielkości wejściowych, których one dotyczą. Inna, często występująca, sytuacja ma miejsce, gdy oddziaływania nie można łatwo opisać jako wpływ na wielkość wejściową. Takie oddziaływania należy uwzględnić w modelu pomiaru jako wpływ na wielkość wyjściową. Te sytuacje mają miejsce we wszystkich rodzajach badań produktów i materiałów, a także przy wytwarzaniu materiałów odniesienia, w ocenie jednorodności lub stabilności partii.

Rozważając, czy oddziaływanie można opisać dostatecznie dobrze, aby umożliwić korekcję, można wyróżnić dwie szerokie kategorie.

- **Dobrze zrozumiane oddziaływania.** Wiele oddziaływań można z powodzeniem zmierzyć lub oszacować przy wystarczająco małej niepewności, aby poprawić wynik pomiaru. Inne mogą być scharakteryzowane małymi niepewnościami w porównaniu z docelową niepewnością pomiaru.
- **Słabo zrozumiane oddziaływania.** Istnieją inne oddziaływania, ale niewiele można powiedzieć o ich wartości, a nawet o ich znaku w danym pomiarze. Niektórych oddziaływań systematycznych nie można łatwo zmierzyć lub scharakteryzować w sposób wystarczający do skorygowania w konkretnym pomiarze. Nie jest możliwe dokonanie korekcji dla żadnego z tych oddziaływań. Mogą one natomiast przyczynić się znacznie do niepewności pomiaru.

Postać matematyczna, w której modelowane jest oddziaływanie, zależy przede wszystkim od tego, czy oddziaływanie jest stałe w zakresie odpowiednich wartości dla odpowiedniej wielkości, czy też jest określone pewną zależnością. W przypadkach gdy istnieje ustalony związek funkcjonalny, należy go zastosować lub uprościć taki związek, jeśli można wykazać, że jest on odpowiedni do zastosowanego celu.

Dobrze zrozumiane oddziaływania wywierają wpływ na estymatę menzurandu, której wartość można określić i dla której można z powodzeniem rozważyć korekcję. Są one włączane do modelu pomiaru poprzez wprowadzenie wielkości wejściowych, jako poprawek lub mnożników poprawkowych, w celu skompensowania odpowiednio oddziaływań addytywnych (bezwzględnych) lub multiplikatywnych (proporcjonalnych do menzurandu). Związane z nimi niepewności opisują wątpliwości co do tego, jak dobrze znane są poprawki lub mnożniki poprawkowe. Wiadomo że niektóre wielkości wejściowe zależą od innych wielkości, dlatego model pomiaru byłby wyrażony w postaci powiększonego zbioru wielkości wejściowych.

W wielu przypadkach poprawki lub mnożniki poprawkowe można opisać za pomocą wyrażeń matematycznych, które reprezentują zjawiska fizyczne powodujące oddziaływanie.

Jeśli nie ma określonego związku między oddziaływaniem a daną wielkością, to często zależność określa się eksperymentalnie. Należy również wziąć pod uwagę możliwość, że składowa niepewności wynikająca z badanego oddziaływania niekoniecznie jest stała w zakresie rozważanych wartości wielkości wywołującej to oddziaływanie. Dobrze opracowany eksperyment dostarcza danych w tym zakresie, dzięki czemu można ocenić, czy składowa niepewności jest najlepiej przybliżona przez udział, który jest niezależny lub proporcjonalny do wartości menzurandu lub ma jakiś inny związek z menzurandem. W pierwszej sytuacji oddziaływanie należy modelować jako składnik addytywny, natomiast w drugiej właściwym wyborem jest mnożnik poprawkowy.

Korekcja odpowiadająca dobrze zrozumiałemu oddziaływaniu powinna zawsze znajdować się w modelu pomiaru w postaci wyrażenia matematycznego. Sposób określenia (nieznanej) wartości korekcji jest kwestią wyboru, w dużej mierze zależną od niepewności docelowej. Wartość jej można określić eksperymentalnie podczas pomiaru lub oszacować na podstawie innych informacji lub przyjąć jako równą zero, jeśli jest addytywna, lub jedności, jeśli jest multiplikatywna, w którym to przypadku korekcja nie wpływa na estymatę menzurandu. Niezależnie od jej wartości, poprawka w modelu pomiaru przyczynia się do niepewności związanej z estymatą menzurandu.

Im większy wysiłek włożymy w wyznaczenie korekcji, tym lepsza jest dostępna wiedza na jej temat i tym bardziej wiarygodna jest wynikająca z tego niepewność. Uproszczenie modelu pomiaru, poprzez zaniedbanie korekcji lub włączenie tylko prostej, przybliżonej jej postaci dla bardziej złożonego oddziaływania, może znacznie

zmniejszyć wysiłek wymagany do scharakteryzowania pomiaru i oceny jego niepewności.

Słabo poznawalne oddziaływania, w przeciwieństwie do tych dobrze poznanych oddziaływań, są znane, ale niewiele można powiedzieć w konkretnych pomiarach o ich wartości, a nawet o ich znaku. Chociaż nie można w użyteczny sposób dokonać korekcji tych oddziaływań, ważne jest, aby uwzględnić je w modelu pomiaru, ponieważ przyczyniają się one do niepewności związanej z estymatą menzurandu.

Przypadki słabo poznanych oddziaływań obejmują oddziaływania spowodowane przez operatorów, warunki pomiarowe utrzymywane w określonych granicach, różne artefakty i próbki. Oddziaływania te, które powodują rozproszenie wartości uzyskanych dla menzurandu, powinny być włączone do modelu pomiaru.

Dostępna wiedza na temat słabo poznanych oddziaływań jest formalnie ujęta w zmiennej losowej o zerowej wartości oczekiwanej oraz odpowiednio w addytywnym lub multiplikatywnym oddziaływaniu, a także odchyleniu standardowym, zapewniającym racjonalną reprezentację niepewności związaną z tym oddziaływaniem. Taka zmienna losowa nie modyfikuje pomiaru, ale przyczynia się do niepewności związanej z tą estymatą.

W wielu przypadkach to samo oddziaływanie wpływa na dwie lub więcej wielkości wejściowych w modelu pomiaru, wprowadzając w ten sposób korelację. Takie oddziaływanie wynika, na przykład, z tego samego układu pomiarowego, wzorca pomiarowego lub danych odniesienia. Niemniej jednak w niektórych sytuacjach może być wygodniejsze zachowanie kowariancji, a nie zwiększanie liczby wielkości wejściowych. W wielu przypadkach nie jest możliwe usunięcie korelacji z powodu niewystarczających informacji. Taka sytuacja może mieć miejsce, gdy wzorce pomiarowe są wzorcowane w określonym laboratorium a stosowane w innym laboratorium do kolejnych wzorcowań.

Korelacja wyodrębnionych oddziaływań wpływa na budowę stosownego modelu pomiaru i na wyznaczenie niepewności związanej z estymatą menzurandu. Warto opisać te wspólne oddziaływania w ramach modeli wielostopniowych.

Dryf i inne oddziaływania zależne od czasu

Wiele wzorców pomiarowych wykazuje dryf w czasie. Wzorec pomiarowy wykorzystywany jako odniesienie zazwyczaj nie jest wzorcowany bezpośrednio przed użyciem. Za każdym razem konieczne jest uaktualnienie jego wartości i niepewności standardowej odzwierciedlającej możliwe zmiany w wzorcu pomiarowym od czasu jego ostatniego wzorcowania. Poprzez dopasowanie

odpowiedniego modelu do zapisanych wartości w zależności od czasu, wartość wzorca pomiarowego i związanej z nim niepewności można określić w momencie jego użycia.

Znając historię wzorca można dostrzec, czy zmienia się on losowo lub czy istnieje tendencja, że zmiany mają charakter liniowy. W przypadku dobrze utrzymanego wzorca pomiarowego model dryfu liniowego jest często właściwy.

Model powinien zawierać człony reprezentujące oddziaływania czasowe. Człony te mogą opisywać korekcje do obserwacji, tak aby odnosiły się one do pojedynczej wielkości zmierzonej w dogodnym czasie odniesienia. Alternatywnie, człony mogą stanowić parametry w modelu obserwacji jako funkcja czasu. Korekcje (w pierwszym przypadku) oraz parametry funkcji (w drugim przypadku) są scharakteryzowane przez estymaty i związane z nimi niepewności oraz kowariancje, czy bardziej ogólnie przez wspólny rozkład prawdopodobieństwa.

Modele statystyczne stosowane w metrologii

Modele statystyczne wykorzystują rozkłady prawdopodobieństwa do ustalenia zmienności powtarzanych obserwacji tej samej właściwości, która zależy od menzurandu, lub rozproszenia wielokrotnie zmierzonych wartości uzyskanych dla tego samego menzurandu, przy nieznannej, pojedynczej prawdziwej wartości menzurandu. Modele tego rodzaju są podstawą wszystkich ocen niepewności typu A, nawet jeżeli nie są wyraźnie sformułowane. Modele statystyczne są matematycznymi lub algorytmicznymi opisami relacji między obserwacjami empirycznymi a wartością jakiejś istotnej właściwości. Cechą charakterystyczną modeli statystycznych, która odróżnia je od innych rodzajów modeli matematycznych, jest to, że rozkłady prawdopodobieństwa są wykorzystywane do uwzględnienia faktu, że obserwacje empiryczne dokonywane wielokrotnie w odniesieniu do tej samej właściwości zazwyczaj się różnią, nawet jeśli wartość tej właściwości pozostaje stała.

Modele statystyczne wykorzystują rozkłady prawdopodobieństwa do opisanie zmienności próbkowania lub bardziej ogólnie niepewności, które sprawiają, że szczegółowe informacje na temat obserwacji (dane empiryczne) są nieprzewidywalne. Jako modele pomiaru można stosować wiele różnych typów modeli statystycznych. Modele statystyczne wiążą dane wejściowe pomiarowe (obserwacje) z prawdziwą wartością menzurandu w sposób probabilistyczny. Na przykład tak zwane *równanie obserwacji* wyraża obserwacje, jako zrealizowane wartości zmiennych losowych, których rozkład prawdopodobieństwa zależy od prawdziwej wartości menzurandu,

a dokładniej gdzie taka wartość prawdziwa jest znaną funkcją jednego lub kilku parametrów, które określają rozkład prawdopodobieństwa obserwacji.

Modele przy wzorcowaniu i analizach

Wzorcowanie przyrządu pomiarowego służy do scharakteryzowania tego, jak zareaguje przyrząd, gdy zostanie zastosowany wzorzec pomiarowy. Ta charakterystyka obejmuje ustalenie relacji (*funkcja wzorcowania*) między wartościami wzorców pomiarowych a wskazaniami przyrządu. Aby zastosować przyrząd w praktyce, potrzebna jest odwrotna zależność, która odwzorowuje wskazanie przyrządu na wartość mierzand. Model statystyczny, zwykle najbardziej odpowiedni przy wzorcowaniu, to regresja, która może być wykorzystywana do tworzenia funkcji analizy bezpośrednio, a nie przez odwrócenie funkcji wzorcowania. Gdy niepewności związane z wartościami wzorców są pomijalne w porównaniu z niepewnościami związanymi ze wskazaniami przyrządu, wystarczająca może być zwykła regresja, gdzie dopasowana krzywa wzorcowania minimalizuje różnice między obserwowanymi a przewidywanymi wartościami wskazań przyrządu. W niektórych przypadkach funkcja analizy (lub pomiaru) jest określana bezpośrednio podczas wzorcowania, a nie poprzez matematyczne odwrócenie odpowiedniej funkcji wzorcowania.

Modele dla korygowania obserwacji

W pomiarach geodezyjnych i astronomicznych, a także w konwencjonalnej metrologii wymiarowej, *korygowanie obserwacji* polega na zastosowaniu modelu pomiarowego i procedury redukcji danych w celu uzyskania wzajemnie spójnych estymat wartości prawdziwych mierzandów. Zastosowania obejmują „wygładzenie” chmur punktów zmierzonych przez różne współrzędnościowe maszyny pomiarowe i wyrażane w odniesieniu do różnych układów odniesienia. We wszystkich przypadkach wymagana jest ocena wyników pomiaru za pomocą wyznaczenia niepewności.

Model, który jest najczęściej używany do korygowania obserwacji, wyraża każdą obserwację jako sumę nieznannej wartości prawdziwej i nieobserwowalnego błędu (który może być skalarem lub wektorem) ze średnią równą zero, gdzie zakłada się, że wartość prawdziwa spełnia określone „równania warunków”. Korygowanie jest zwykle przeprowadzane przy użyciu metody najmniejszych kwadratów, która jest równoważna metodzie największego prawdopodobieństwa, kiedy zakłada się, że błędy są wynikiem niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie normalnym.

Bayesowskie modele statystyczne

Bayesowskie modele statystyczne odzwierciedlają rozumienie niepewności, jako charakteryzujące stany niepełnej wiedzy o prawdziwej wartości wielkości wejściowych i mierzand. Są szczególnie przydatne, gdy istnieje informacja o rzeczywistej wartości mierzand przed uzyskaniem wyników nowego pomiaru, umożliwiając aktualizację takich informacji o dane, które zostaną uzyskane w tym nowym pomiarze.

Charakterystyczną cechą podejścia bayesowskiego jest to, że dane eksperymentalne są modelowane jako zrealizowane wartości lub wyniki zmiennych losowych z rozkładami prawdopodobieństwa obejmującymi parametry, których wartości są nieznane lub znane niecałkowicie. Parametry te są modelowane jako zmienne losowe, stąd też mierzand jest funkcją tych parametrów. Jednak żadna z tych zmiennych losowych nie jest dostępna do bezpośredniej obserwacji, a wiedzę o ich wartościach uzyskuje się jedynie na podstawie danych empirycznych. Estymaty i wyznaczone niepewności dla parametrów są wyprowadzane z warunkowego rozkładu prawdopodobieństwa parametrów dla zadanych danych (*rozkład a posteriori*). Rozkład przypisany mierzandowi i wszelkim innym wielkościom, których wartości są nieznane, nazywa się *rozkładem a priori*. Przekazuje on istniejącą wiedzę na temat mierzand, zanim jakiegokolwiek nowe dane zostaną uzyskane w nowym eksperymencie pomiarowym. Wiedza ta może pochodzić z danych historycznych, opisuje przykładowo w tym przypadku przypisanie wartości do materiałów odniesienia czy wzorców pomiarowych, lub może odzwierciedlać subiektywną ekspercką ocenę tego co wiadomo o wartości mierzand.

Opracowanie modelu bayesowskiego w praktyce obejmuje wybór rozkładu a priori. Ten wybór jest zazwyczaj wymagający. Ponadto implementacja i stosowanie modelu bayesowskiego w praktyce wymaga znajomości odpowiedniego specjalistycznego oprogramowania do obliczeń statystycznych.

Procedury bayesowskie tworzą rozkład prawdopodobieństwa dla parametrów rozkładu leżących u podstaw danych wejściowych (lub arbitralnie dużej próby pobranej z tego rozkładu), z którego można w prosty sposób wyprowadzić rozkład prawdopodobieństwa dla mierzand. Rozkład ten zależy nie tylko od modelu zastosowanego dla obserwacji, ale także od wcześniejszego rozkładu wybranego dla parametrów mierzand.

Ocena adekwatności modelu pomiaru

Model pomiaru jest odpowiedni, jeżeli estymata mierzand, otrzymana przy jego zastosowaniu, jest

skorygowana o wszystkie znane oddziaływania, a związana z nią niepewność odzwierciedla wszystkie czynniki, które mogłyby w uzasadniony sposób wpłynąć na estymatę. W takim przypadku wartości dla tej samej mierzalności, uzyskane przy użyciu modeli alternatywnych, powinny być zgodne w ramach określonych niepewności. Ponadto model pomiaru powinien zapewnić estymaty i związane z nimi niepewności dla całego zakresu mierzalności i wartości wielkości wejściowych, dla których został opracowany.

Doświadczalna realizacja pomiaru w układzie pomiarowym to najbardziej ogólne sprawdzenie adekwatności wybranego modelu. Takie dowody są zwykle uzyskiwane podczas walidacji procedury pomiarowej. Istnieją różne sposoby eksperymentalnej oceny modelu pomiarowego, takie jak:

- udział w porównaniach międzylaboratoryjnych i wykorzystanie estymaty i niepewności z modelu pomiarowego przy ich ocenie,
- stosowanie certyfikowanego materiału odniesienia (CRM) lub metody odniesienia do oceny wykonania procedury pomiarowej,
- porównanie wyników modelu pomiarowego z danymi literaturowymi lub odniesieniami.

Poprzez wykazanie zgodności między wartościami zmierzonymi i wartościami odniesienia, w ramach odpowiednich niepewności, zapewniona jest adekwatność modelu. Podobnie nieoczekiwana niezgodność zwykle wymaga dalszych badań i powinna skutkować udoskonaleniami preferowanego modelu pomiaru.

Dane odniesienia, dokładne lub nie, są szeroko stosowane w celach porównań. „Dokładne” dane można często uzyskać poprzez odwrócenie proponowanego modelu w celu wygenerowania przykładowych danych z zadanych wartości dla mierzalności. Proces ten daje pewność, że model został prawidłowo zastosowany. Tam gdzie możliwe jest wygenerowanie przykładowych danych z bardziej kompletnego modelu lub z danych dotyczących dobrze scharakteryzowanych pozycji badawczych, wykazanie, że oczekiwany wynik zostanie zwrócony, zapewni dodatkowe zaufanie do faktycznie używanego modelu. W wielu przypadkach przykładowe dane i obliczenia są publikowane w postaci odpowiednich metod pomiarowych lub badawczych. Porównanie obliczonych wyników z tymi dla odpowiednich wzorców dostarcza dowodów na adekwatność modelu. Oceniając adekwatność w zakresie lub podzakresie zwykle wystarczy zbadać zamierzone ekstrema i niewielką liczbę przypadków pośrednich. Szczególną uwagę należy zwrócić na strefy, w których zmieniają się założenia modelowania. Jeżeli liczba członów w modelu obliczeniowym jest dostosowywana w zależności od zmierzonej odpowiedzi,

adekwatność modelu należy potwierdzić w pobliżu każdego takiego punktu decyzyjnego. Należy zwrócić uwagę na wrażliwość wyniku pomiaru na wybór modelu.

Oprócz sprawdzania wielkości wyjściowych modelu pomiaru istnieje kilka innych, które są szczególnie pomocne w weryfikacji poprawności tego modelu. Działania te obejmują następujące czynności:

- przegląd składowych w modelu pomiaru,
- sprawdzenie, czy model uproszczony odpowiednio odtwarza wyniki bardziej kompletnego modelu, który aproksymuje się przy użyciu np. docelowej niepewności pomiaru,
- potwierdzenie, że dokładność numeryczna komputera jest wystarczająca dla określonego zastosowania,
- w przypadku modeli dopasowanych do danych, weryfikacja poprawności modelu i przyjętych założeń dotyczących rozkładu,
- uzyskanie dowodów przydatności modelu na podstawie literatury naukowej,
- uzyskanie eksperymentalnych dowodów na to, że model działa odpowiednio do zamierzonego zastosowania,
- potwierdzenie, że niepewności przewidywane przez model są zgodne z obserwowaną wykonalnością procedury pomiarowej.

Należy zweryfikować składowe w modelu pomiaru. Obejmują one składowe uzyskane na podstawie ustalonych zasad naukowych oraz oddziaływania wynikające z rozważań metrologicznych. Gdy proponowany model jest celowym uproszczeniem bardziej złożonego modelu, który można również zastosować, porównanie wyników uzyskanych przez oba modele będzie wskazywać na zgodność między nimi. Jeżeli niepewności pomiaru i różnice w obliczonych wartościach są małe w porównaniu z docelową niepewnością pomiaru, uproszczony model można uznać za odpowiedni.

Wykorzystanie modelu pomiaru

Głównym zastosowaniem modelu pomiaru jest obliczenie estymaty mierzalności i związanej z nią niepewności. W zależności od wymagań niepewność może być podawana jako niepewność standardowa lub przedział rozszerzenia dla określonego prawdopodobieństwa rozszerzenia. Zwłaszcza, w przypadku stosowania metod Monte Carlo lub bayesowskich, bardziej odpowiednie może być przedstawienie rozkładu prawdopodobieństwa dla mierzalności. To ostatnie jest szczególnie przydatne, gdy wielkość wyjściowa modelu pomiaru jest używana do późniejszego obliczenia niepewności, przyjmując rozkład prawdopodobieństwa, jako wielkość wejściowa.

Przy danych wartościach wielkości wejściowych w modelu pomiaru odpowiadająca im wartość

menzurandu jest uzyskiwana poprzez obliczenie wzoru lub rozwiązanie równania. Niektóre wielkości mogą mieć wartości zespolone. Może istnieć pojedynczy (skalarny) menzurand lub wiele takich menzurandów (menzurand wektorowy). Narzędzia matematyczne, statystyczne lub numeryczne, zastosowane do uzyskania estymaty menzurandu i wyznaczenia niepewności, zależą od postaci modelu pomiaru.

Prawo propagacji niepewności obowiązuje dla liniowego modelu pomiaru, to znaczy modelu, który jest liniowy pod względem wielkości wejściowych. Dla pojedynczej wielkości wyjściowej Y przyjmuje liniową postać:

$$Y = c_0 + c_1 X_1 + \dots + c_N X_N \quad (1)$$

gdzie c_i to stałe a X_i to wielkości wejściowe. Wyrażenie to w prosty sposób jest uogólniane na modele wielowymiarowe i na modele obejmujące wielkości zespolone.

Nieliniowy model pomiaru to model, którego nie można wyrazić w postaci równania (1). Przy pewnym stopniu przybliżenia model nieliniowy można wyrazić lokalnie w postaci liniowej w sąsiedztwie estymat x_i wielkości wejściowych. Na podstawie tej postaci liniowej można zastosować prawo propagacji niepewności, aby uzyskać przybliżenie niepewności standardowej związanej z estymatą y wielkości wyjściowej.

Stosowanie modelu pomiaru do ekstrapolacji poza przedział, w którym jest on uznawany za ważny, jest niewskazane. Zasadniczo nie jest bezpieczne dopasowanie modelu empirycznego lub hybrydowego do danych i używanie modelu poza zakresem dopasowanych danych. Ekstrapolacja z funkcjami czysto empirycznymi, takimi jak wielomiany czy splajny, jest szczególnie niebezpieczna. Takie funkcje mogą wykazywać fałszywe zachowanie poza zakresem danych i nie powinny być używane do tego celu. W pewnych okolicznościach model teoretyczny może być stosowany z ostrożnością do ekstrapolacji poza zakres danych, który go definiuje, gdy ocenia się, że model odpowiednio opisuje określone zjawisko.

Ogólna klasyfikacja modeli pomiaru

Modele pomiaru klasyfikowane są na jedno i wielowymiarowe, jawne i niejawne oraz skalarnie i zespolone (złożone).

Model pomiaru odnoszący się do pojedynczej wielkości wyjściowej Y i do wielkości wejściowych X_i jest określany jako jednowymiarowy i jawny. Podając wartości dla wielkości wejściowych model jawny umożliwia bezpośrednie określenie odpowiadającej wartości wielkości wyjściowej. Model pomiaru w postaci:

$$Y_1 = f_1(X_1, \dots, X_N), \dots, Y_m = f_m(X_1, \dots, X_N) \quad (2)$$

gdzie Y_1, \dots, Y_m to m wielkości wyjściowych, a f_1, \dots, f_m oznacza m funkcji pomiaru, jest określany jako wielowymiarowy i jawny. Model pomiaru przyjmujący postać:

$$h(Y, X_1, \dots, X_N) = 0 \quad (3)$$

gdzie Y jest skalarną wielkością wyjściową, a h oznacza funkcję Y i wielkości wejściowych X_1, \dots, X_N , jest określany jako jednowymiarowy i niejawny. W szczególności równania (3) nie można łatwo przedstawić w postaci funkcji pomiaru. Na ogół jest to rozwiązywane numerycznie, realizowane za pomocą procedury iteracyjnej. Z kolei model pomiaru postaci:

$$h_1(Y_1, X_1, \dots, X_N) = 0, \dots, h_m(Y_m, X_1, \dots, X_N) = 0 \quad (4)$$

z pośrednio definiowanymi wielkościami wyjściowymi Y_1, \dots, Y_m , pod względem wielkości wejściowych X_1, \dots, X_N , jest określany jako wielowymiarowy i niejawny. Zwykle równanie (4) nie łatwo jest przedstawić w postaci funkcji pomiaru f_1, \dots, f_m , jak w jawnym przypadku wielowymiarowym.

Natomiast złożony model pomiaru obejmuje co najmniej jedną wielkość o wartości zespolonej. Modele złożone można również sklasyfikować jako jednowymiarowe i jawne, wielowymiarowe i jawne, jednowymiarowe i niejawne oraz wielowymiarowe i niejawne.

Dodatkowe rozważania

Dokument zawiera pięć uzupełnień dotyczących:

- modelowania pomiarów dynamicznych za pomocą liniowych układów niezmiennych w czasie, w tym modele czasu ciągłego i modele dyskretne,
- modelowania zmiennej losowej, w tym obejmującego:
 - włączanie zmiennych losowych do modelu pomiaru,
 - zmienne losowe związane z wielkością wyjściową,
 - zmienne losowe jako oddziaływania związane z menzurandem,
 - źródła zmiennych losowych,
 - asymetryczne rozkłady dla oddziaływań,
- przedstawiania wielomianów,
- analizy przyczynowo-skutkowej,
- linearyzacji modelu pomiaru i sprawdzenie jego adekwatności.

Podsumowanie

Przedstawiony dokument ukazuje się po dłuższej przerwie od ostatniego [6], którego publikacja miała miejsce w 2012 roku. Jest szczególnie istotny, ze względu na zawarte w nim podejście modelowe przy opracowaniu danych pomiarowych, lansowane szczególnie w przewodnikach [4] i [5]. Wychodzi naprzeciw oczekiwaniu

potwierdzenia tego, że model pomiaru, w każdej możliwej postaci, jest warunkiem koniecznym przy obliczaniu wyniku pomiaru. Współczesna postać wyniku ma charakter probabilistyczny, wyznaczany bezpośrednio za pośrednictwem modelu, którego dopiero parametry określają wartość mierzandemu wraz z jego niepewnością. Dokument znacząco część miejsca poświęca oddziaływaniom, rozumianym jak wielkości wpływające. Przy tworzeniu modelu pomiaru należy je uwzględniać, gdyż w istotny sposób wpływają na niepewność pomiaru. Często liczba uwzględnianych oddziaływań i sposób ich oszacowania wpływa zasadniczo na wynik pomiaru, nawet bardziej niż statystyczne rozproszenie wartości obserwacji w przeprowadzonym pomiarze. Szczególnie dotyczy to pomiarów wykonywanych na stabilnym obiekcie w stabilnych warunkach pomiarowych, takich jak przy wzorcowaniu.

Omówiony Przewodnik jest naturalną kontynuacją rozważań zawartych w klasycznym już dziele dotyczącym wyrażania niepewności pomiaru [2], od którego pierwszego wydania upłynęło już ponad 25 lat. Jest świadectwem ewolucji jaka dokonuje się w obszarze metrologii, nastawionej na probabilistyczne podejście w dziedzinie opracowania danych pomiarowych. Model pomiaru stał się podstawą przy opracowaniu wyniku pomiaru, niezależnie od dziedziny pomiarowej, w laboratoriach badawczych i wzorcujących, jak również przy opracowaniu wyników badań naukowych.

Bibliografia

- [1] JCGM GUM-6:2020 Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models.
- [2] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [3] JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents.
- [4] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method.
- [5] JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities.
- [6] JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
- [7] P. Fotowicz: Omówienie międzynarodowego dokumentu Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Biuletyn GUM, nr 3 (2007), s. 3-10.
- [8] P. Fotowicz: Omówienie międzynarodowego dokumentu JCGM 102:2011 dotyczącego wyrażania niepewności pomiaru. Biuletyn GUM nr 3 (2014), s. 17-20.
- [9] JCGM 100:2008 Ewaluacja danych pomiarowych – Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru.
- [10] PKN-ISO/IEC Guide 99. Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM).



Paweł Fotowicz

Doktor nauk technicznych, redaktor naczelny Biuletynu *Metrologia i Probiernictwo* i wykładowca w Głównym Urzędzie Miar. Prowadzący seminaria GUM i kursy szkoleniowe dotyczące podstaw metrologii i praktyki obliczania niepewności pomiaru. Autor ponad stu pięćdziesięciu publikacji dotyczących teoretycznych zagadnień metrologii, m. in. w międzynarodowych i krajowych czasopismach naukowych takich jak: *Metrologia, Measurement, Measurement Science and Technology, Metrology and Measurement Systems, PAK* czy *PAR*. Redaktor i współredaktor opracowań monograficznych: *Niepewność pomiarów w teorii i praktyce* oraz *Polska Administracja Miar – Vademecum*.