

Niepewność pomiaru

Dokonując jakiegoś pomiaru aparaturą pomiarową, urządzeniem pomiarowym lub narzędziami pomiarowymi wysokiej jakości, jesteśmy przekonani o prawdziwości i dokładności uzyskanego wyniku. Jednak w przyrodzie, w fizyce, nie ma w rzeczywistości prawdziwych i pewnych pomiarów. Pojęcie wartości rzeczywistej jest pewną abstrakcją i w zasadzie nie występuje w praktyce. Można jedynie wyznaczyć przedział, w którym wartość wyniku pomiaru się znajduje. Z wszelkimi wykonywanymi pomiarami związana jest niepewność ich wyników – niepewność pomiaru.

Aleksander Łukomski

W 1999 roku Główny Urząd Miar wydał polską wersję normy ISO: „Wyrażanie niepewności pomiaru – Przewodnik”, w której zawarto definicję niepewności pomiaru: „Niepewność pomiaru jest to parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, który można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej”. Norma ISO podaje rozróżnienie między pojęciami „niepewność pomiaru”, a „błąd” oraz podaje jednolitą terminologię i metody określania niepewności pomiaru. Dotąd słowo „błąd” miało dwa znaczenia: pierwszym z nich była nazwa dla przypadku, gdy wynik pomiaru przyjmuje wartość różną od wartości prawdziwej. Drugim znaczeniem słowa „błąd” była jego liczbowa miara.

Znaczenia te przedstawia się w postaci:

- **Ilościowej**, będącej różnicą, także nieznaną, między wartością zmierzoną a wartością prawdziwą;
- **jakościowej**, która często używana jest w terminach: błąd systematyczny, błąd przypadkowy oraz błąd grubo.

W uproszczeniu, wyniki pomiarów wielkości fizycznych i chemicznych wraz z informacją ilościową o jakości pomiarów, są niepewnością pomiaru. Pozwala ona na porównanie ich z wartościami odniesienia podanymi

w specyfikacjach lub normach lub do oszacowania ich wiarygodności w porównaniu z wynikami uzyskanymi przez inne laboratoria.

Niepewność jest związana z wynikami pomiarów i badań. Wyniki pomiarów pozbawione oceny ich dokładności są w zasadzie tylko wskazaniami.

Podając wyniki pomiarów wielkości fizycznych powinno się podawać również informację ilościową o dokładności tych pomiarów. Jest to konieczne dla tego, kto wykorzystuje te pomiary w swojej pracy, po to aby oszacować ich wiarygodność. Bez tej informacji wyniki pomiarów nie mogą być porównywane ze sobą, ani z wartościami odniesienia podawanymi w specyfikacjach lub normach.

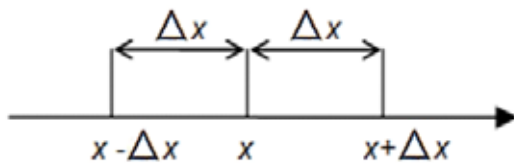
Zagadnienie pomiarów i ich niepewności występuje w wielu dziedzinach, poczynając od nauki i wszelkich badań naukowych, a zwłaszcza laboratoryjnych, w technice w kontroli wymiarowej, parametrycznej, badaniach prototypów, wszelkich analizach projektowych i badawczych (także eksploatacyjnych), ekspertyzach i opiniach technicznych, ale też np. w wycenach, gdzie wartości są szacowane. Ale nie tylko nauka i technika borykają się z problemem niepewności pomiarowej. Problem ten występuje bardzo powszechnie we wszelkiej statystyce i sprawozdawczości dotyczącej także

spraw społecznych i ekonomicznych. Używane są tu jednak inne narzędzia pomiarowe. Jest to obszerne zagadnienie, dosyć dobrze rozpoznane i opisane. Wiele instytucji przez lata wypracowywało metodykę, procedury i formalizowało sporządzanie sprawozdań z różnego rodzaju badań, pomiarów i dopuszczalnych wartości ich niepewności. Przykładem może tu być Główny Urząd Statystyczny. Pewne elementy metodyki, procedur i sprawozdawczości zostały sformalizowane też prawnie.

W ostatnim czasie zaczęto przywiązywać większą wagę do niepewności pomiarów, w odniesieniu do typowych pomiarów laboratoryjnych i przemysłowych.

Niepewność pomiaru można przedstawić w postaci formuły:

$$X = x \pm \Delta x$$



gdzie:

X – wielkość mierzona

x – wartość zmierzona

Δx – niepewność pomiaru, rozszerzona

Wielkość przedziału zależy od założonego poziomu ufności, który jest wynikiem wnikliwej analizy wszystkich składowych niepewności. Źle przeprowadzona analiza składowych niepewności może doprowadzić do sytuacji, w której zostanie zaakceptowany wynik niezgodny lub może zostać odrzucony wynik zgodny.

Dobra metoda szacowania i wyrażania niepewności pomiaru powinna być uniwersalna, tak aby mogła być stosowana do wszystkich rodzajów pomiarów i do wszystkich typów danych wejściowych używanych w tych pomiarach.

Na niepewność pomiaru składa się szereg składników, które można podzielić na dwie

kategorie, zgodnie ze sposobem obliczania ich wartości liczbowych :

- niepewność typu A – która została obliczona metodami statystycznymi na podstawie serii pojedynczych obserwacji lub pomiarów,
- niepewność typu B – która została obliczona innymi sposobami.

Rozróżnia się jeszcze :

- Niepewność złożoną oznaczaną jako u – na którą składa się połączona niepewność typu A i typu B. W praktyce występuje zazwyczaj niepewność złożona. Zdarzają się jednak przypadki, kiedy cała analiza niepewności sprowadza się do typu B.
- Niepewność rozszerzona – U to wielkość przedziału wartości wokół wyniku pomiaru, który może obejmować dużą część rozkładu wartości, przypisywanych w sposób uzasadniony wielkości mierzonej.

Do określania niepewności rozszerzonej stosuje się współczynnik k . Współczynnik rozszerzenia k jest współczynnikiem liczbowym, stosowanym jako mnożnik złożonej niepewności standardowej, dla otrzymania niepewności rozszerzonej. Powszechnie stosowanym współczynnikiem k jest wartość liczbowa 2, odpowiadająca poziomowi ufności 95%.

$$U = k \cdot u$$

Niepewność względna pomiaru, mieszcząca się w granicach od 0,1% do 10%, jest typowa dla doświadczeń w laboratoriach uczelnianych. Niepewność rzędu kilkudziesięciu procent powinna spowodować zmianę metodyki, zmianę narzędzia lub przyrządu pomiarowego, albo odrzucenie któregoś z pomiarów, wyraźnie odbiegającego od pozostałych. Wartość niepewności poniżej 0,1% też nie jest dobra, gdyż taki lub lepszy poziom dokładności można uzyskać w najlepszych laboratoriach naukowych. Dlatego warto wtedy zweryfikować prawidłowość obliczeń.

Jest wiele podejść do oceny niepewności pomiaru, polegających na wyznaczeniu niepewności standardowej, opartej na odchyleniu standardowym pomiaru, albo bardziej



ostrożnym podejściu do dokładności pomiaru, jakim jest ocena za pomocą niepewności maksymalnej, która to metoda szczególnie nadaje się do szybkiego oszacowania niepewności pomiaru. Są znane i inne metody.

Bardzo często dla uzyskania zwiększonego prawdopodobieństwa i pewności pomiaru stosuje się wielokrotny pomiar tego samego wymiaru. Uzyskuje się wtedy szereg różniących się pomiarów, które można przedstawić na krzywej rozkładu normalnego Gaussa, gdy tych pomiarów jest więcej (powyżej 10) lub Studenta, gdy jest ich mniej. Znane są też inne przedstawienia np. rozkładu jednostajnego lub V.

W nauce i technice oraz w instytucjach, które wykorzystują wyniki badań w swojej działalności, znajomość zagadnienia niepewności pomiarów może się okazać niezwykle ważnym elementem (nawet kluczowym). Przyjęta metodyka, sprzęt, narzędzia pomiarowe, a także doświadczenie i procedury jednostki wykonującej pomiar są elementami, które wnoszą jakąś niepewność do wyniku.

Działaniem do odnalezienia przybliżonej wartości wielkości mierzonej jest pomiar, którego każdorazowy wynik jest obarczony niepewnością. Wpływa na to wiele czynników jak np.:

- ograniczona dokładność narzędzi i przyrządów pomiarowych,
- niedoskonałość zmysłów mierniczego,
- rodzaj zastosowanej metody pomiarowej,
- wpływ innych zmiennych zakłócających pomiar.

Na niepewność pomiaru wpływają różne czynniki, wobec tego nie powinno się mówić o niepewności pomiaru przyrządu, lecz o niepewności pomiaru przyrządem, np. suwmiarką czy mikrometrem. Należy to jednak rozszerzyć o dodatkowe informacje:

- dotyczące przyrządu, np. że pomiar wykonano mikrometrem analogowym o wartości działki elementarnej 0,01 mm, zamocowanym w podstawce albo trzymany w ręce;
- dotyczące przedmiotu pomiaru i rodzaju wymiaru, np. że mierzono średnicę czopa wału dwupunktowo;

- dotyczące warunków pomiaru, np. że pomiar wykonywano w hali produkcyjnej, w temperaturze w przedziale 16–20 °C lub 20-28 °C;
- o osobie wykonującej pomiar, np. pomiar jest wykonywany przez operatora obrabiarki, który odczytał wskazania mikrometru, przy zastosowaniu interpolacji, z dokładnością do 0,001 mm;
- i o inne informacje ważne z punktu widzenia niepewności pomiaru, jak np. o przyjętym współczynniku rozszerzalności liniowej materiału przedmiotu, albo że powtarzalność pomiaru obliczono jako odchylenie standardowe na podstawie dziesięciu powtórzeń pomiaru.

Oprócz oczywistego czynnika, jakim jest błąd wskazań, analiza wpływu mikrometru powinna obejmować wpływ błędów równoległości i błędów płaskości powierzchni pomiarowych, również ewentualny wpływ nacisku pomiarowego. Dla przedmiotu pomiaru ważne mogą być informacje, np. dotyczące materiału, jego współczynnika rozszerzalności, module sprężystości, odchyłce lub tolerancji kształtu walcowości lub okrągłości.

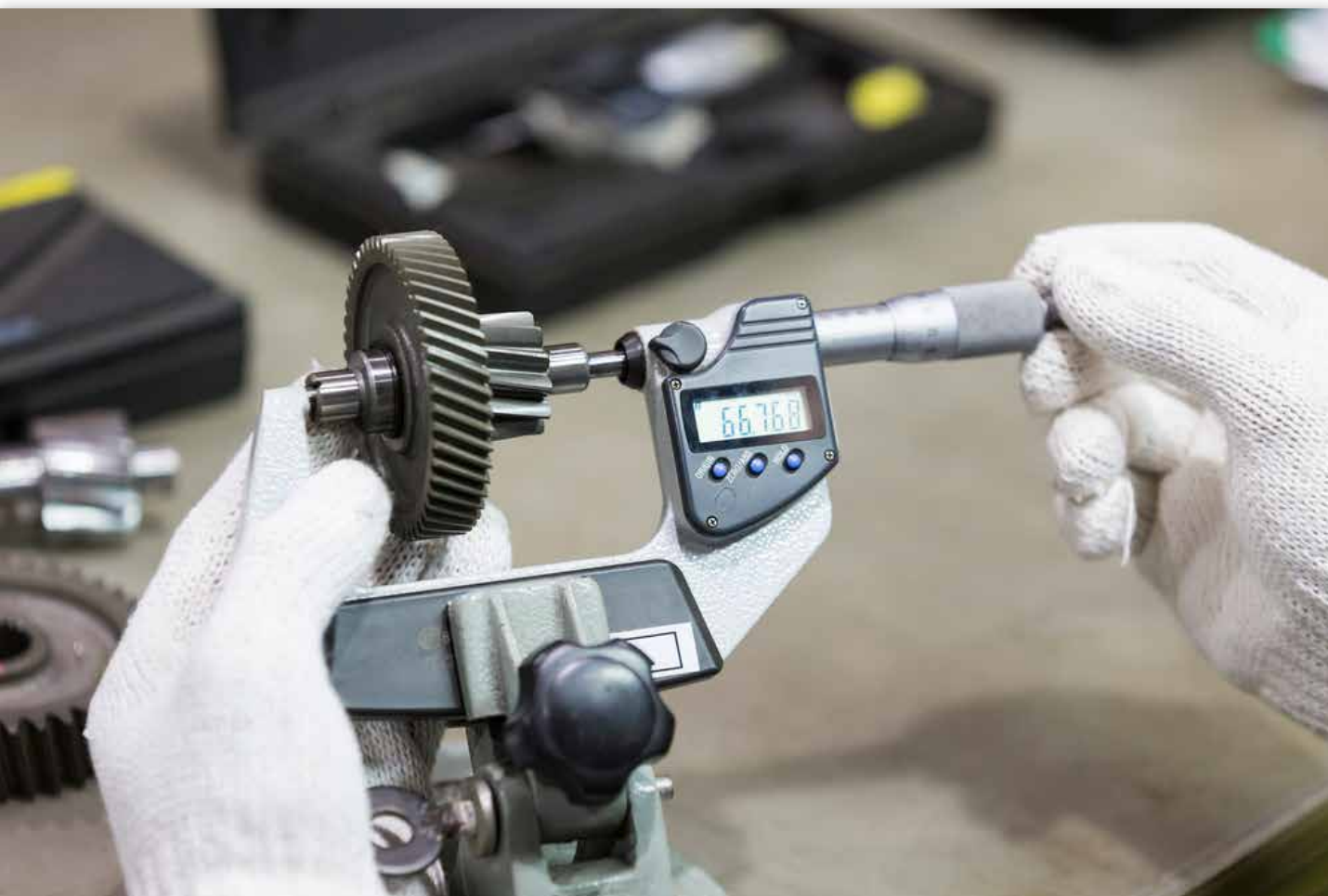
Przykładem na niepewność pomiaru może być interpretacja odczytania pomiaru ciśnienia za pomocą manometru. Manometry wybiera się z wykazu manometrów dla odpowiedniej klasy dokładności i związanej z tym liczby podziałek na tarczy przyrządu. Z wykazu dla

manometru o najniższej klasie dokładności (klasa 2,5) i ciśnieniu w zakresie 0 – 10 bar, wartość podziałki wynosi 0,5 bar. Można zatem powiedzieć, że możliwe do ustawienia na zaworze redukcyjnym, przy pomocy takiego manometru ciśnienie powinno mieścić się w zakresie 6 bar +/- 0,5 bara. tj. od 5,5 do 6,5 bara. Oczywiście problem tego zakresu pomiaru, tu zależny tylko od działki elementarnej aparatu pomiarowego, może być jeszcze dodatkowo uzależniony np. od błędu odczytu i wtedy może przyjąć większy zakres niepewności pomiarowej.

Ważny też może być wpływ warunków środowiskowych, w jakich wykonywany jest pomiar. Powinny być znane wartości dotyczące warunków temperaturowych: odstępstwo temperatury przyrządu od temperatury odniesienia, maksymalna różnica temperatury mierzonego przedmiotu i przyrządu. Ocena wpływu osoby wykonującej pomiar może dotyczyć liczbowego wskaźnika umiejętności i wygody pomiaru. Znany jest przypadek narzędziowni, gdzie otwarcie bramy hali powodowało przewiew i czasową obniżkę temperatury, i w wyniku tego – „ucieczkę” mikronów.

Klasyfikacja poszczególnych czynników jest w dużym stopniu umowna. W praktyce zdarzają się przypadki, gdy tylko niewielka liczba czynników będzie miała istotny wpływ na wartość niepewności.

PN-EN 9001 Systemy zarządzania jakością – Wymagania
PN-EN ISO/IEC 17025 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących
PN-EN ISO 15189 Laboratoria medyczne – Szczególne wymagania dotyczące jakości i kompetencji
PN-EN ISO 14001 Systemy zarządzania środowiskowego – Wymagania i wytyczne stosowania
PN-N 18001 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Wymagania
PN-EN 22000 Systemy zarządzania bezpieczeństwem żywności
ISO/TS 16949 specyfikacja techniczna ISO branży motoryzacyjnej



Ocena dokładności wykonania części maszyn odbywa się najczęściej na podstawie pojedynczego pomiaru. Należy jednak mieć świadomość, że gdyby powtórzyć ten pomiar wielokrotnie, zwłaszcza z użyciem różnych egzemplarzy narzędzi, czy przyrządów pomiarowych i w dużych odstępach czasu, to w kolejnych powtórzeniach będą się pojawiać różne wyniki, a ich rozrzut można scharakteryzować przez obliczenie ich odchylenia standardowego. Gdyby powtórzenia wykonać bezpośrednio po sobie, to istnienie rozrzutu należałoby przypisać błędom przypadkowym, pochodzącym głównie od osoby mierniczego i wygody wykonywania pomiaru, a obliczone wtedy odchylenie standardowe jest miarą tzw. powtarzalności. Gdyby zaś kolejne powtórzenia rozłożyć w czasie, to obliczone odchylenie standardowe będzie miało większą wartość, bo na wyniki wpłyną dodatkowe czynniki, np. zmiany temperatury. Inaczej podchodzi się do pomiaru skomplikowanych przyrządów,

dokładnych narzędzi, czy bardzo precyzyjnych części maszyn.

Zadaniem pomiarów jest pozyskanie wiarygodnych informacji jakościowych i ilościowych o badanym obiekcie, tak aby otrzymane wyniki badań służyły założonemu celowi. Błędne wyniki powodują dezinformację, które mogą prowadzić do podejmowania złych decyzji.

Metoda jaką wybiera się do obliczenia niepewności zależy od tego, w jaki sposób były wykonywane pomiary, które mogą być bezpośrednie lub pośrednie. Bezpośrednie są wtedy, gdy wielkość mierzona możemy bezpośrednio porównać ze wzorcem, albo gdy do wykonania pomiaru wykorzystano jedno narzędzie pomiarowe, lub jeden przyrząd, który od razu podaje gotowy wynik, np. pomiar przymiarem. Pośrednie są wtedy, kiedy mamy do czynienia z pomiarami bezpośrednimi jednej lub kilku wielkości fizycznych, celem określenia wielkości od nich zależnej, np. wyznaczenie objętości (w technice jest

wiele takich pomiarów np. pomiar stożka poprzez wałeczki, czy pomiar koła zębatego przez n zębów).

Wyliczanie niepewności pomiaru bazuje na teorii niepewności zakładającej, że błąd pomiaru ma cechy zdarzenia losowego, co świadczy, iż podlega on prawom statystyki.

Wynik pomiaru powinno podawać się wraz z niepewnością. Obie wielkości należy wyrazić w jednostkach podstawowych układu SI. Zapis wyniku pomiarów można uzupełnić również o liczbę pomiarów stanowiących podstawę obliczeń niepewności. Więcej na temat zapisu – w bibliografii.

Jest jeszcze jeden aspekt, prawny, niepewności pomiarowej. Zgodnie z wymaganiami odpowiednich norm i przepisów dla systemów zarządzania, jednostki powinny wzorcować i sprawdzać w okresach między wzorcowaniami użytkowane przez nich narzędzia, aparaty i przyrządy pomiarowe. Wymagania odnośnie wzorcowania oraz sprawdzania, jak również ich częstotliwości, są często określane w normach branżowych, dotyczących produkcji lub badań oraz innych dokumentach prawnych międzynarodowych, dla różnych branż.

Jednak ocena zgodności, legalizacja WE i legalizacja ponowna nie zastępują wzorcowania.

Niektóre systemy zarządzania i wymagania związane z pomiarami zawarte są w normach, których przykłady podano poniżej:

W codziennej praktyce przemysłowej rzadko stosuje się w sposób wprost analizowanie, obliczanie i podawanie niepewności pomiaru. Jednak nie znaczy to, że się tego w ogóle nie stosuje. W wielu fabrykach opracowano procedury pomiarów bezpośrednich i pośrednich oraz sposoby przedstawiania pomiarów, które w sposób pośredni zawierają metodykę wyznaczającą założoną niepewność np. wielokrotność pomiaru jakiejś założonej wartości i jej uśrednianie. Również analiza i określenie tolerancji zawiera elementy niepewności pomiaru. Stosuje się też statystyczną kontrolę jakości i bada rozkład tolerancji, tak sterując produkcją w kolejnych etapach, żeby uzyskać zakładany obszar lub zawężenie tolerancji. Szacowanie niepewności

pomiaru ważne jest też w pracach technicznych eksperckich, gdzie obowiązkowo musi być podana metodyka, procedura i opisanie wyników w sprawozdaniu.

Trochę inaczej wygląda to w badaniach naukowych, gdzie niepewność pomiaru ma bardzo istotne znaczenie dla wyników badań i powinna być podawana łącznie z metodyką, procedurą i sposobem wykonania sprawozdania z badań.

Podobnie ma się sprawa niepewności pomiaru w badaniach statystycznych, gdzie również musi być znana i opisana metodyka, procedury i sprawozdania. Inaczej badania takie są niewiele warte, gdyż tracą możliwość porównawczą, a nawet wiarygodność, i nie powinny być powodem podejmowania jakichkolwiek decyzji.

Przedstawione powyżej (bardzo skrótowo) zagadnienie niepewności pomiaru odgrywa coraz większą rolę wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z pomiarami, które mogą w istotny sposób wpływać na decyzje, zarówno w nauce, przemyśle czy naukach społecznych. Dlatego znajomość tematyki i poszerzanie wiedzy z tego obszaru jest bardzo istotne.

Aleksander Łukomski

Bibliografia

- [1] W. Jakubiec, W. Płowucha, P. Rosner: *Szacowanie niepewności pomiaru w budowie maszyn*. Budżet niepewności; DOI:10.17814/mechanik.2016.12.567
- [2] H. Szydłowski: *Pracownia fizyczna wspomagana komputerowo*, PWN 2012
- [3] P. Burnos: *Analiza błędów i niepewności wyników pomiarowych*, Laboratorium Metrologii, Katedra Metrologii, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie 2010
- [4] Główny Urząd Miar, *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik, Warszawa 1999
- [5] A. Kubiaczyk: *Określenie niepewności pomiarów (poradnik do Laboratorium Fizyki)*, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska 2018
- [6] H. Terenowski: *Szacowanie niepewności pomiaru*, Problemy Techniki Uzbrojenia, 2010, nr 39