

Metrologia: definicje i pojęcia podstawowe



dr inż. Paweł Zalewski
Akademia Morska w Szczecinie

Pojęcia podstawowe:

Metrologia jest nauką zajmująca się sposobami dokonywania pomiarów oraz zasadami interpretacji uzyskanych wyników.

Można wyróżnić następujące rodzaje metrologii:

- ogólną,
- stosowaną (przemysłową),
- teoretyczną (naukową),
- prawną.

Podstawą metrologii są **jednostki miar**. Jednostki grupowane są w układy. Obecnie najpowszechniej używanym standardem jest układ SI.

Część metrologii zajmująca się praktycznym uzyskiwaniem wyników pomiarów to **miernictwo**. Dlatego metrologia zajmuje się również narzędziami służącymi do pomiaru, czyli narzędziami pomiarowymi.

Pojęcia podstawowe:

Według definicji podanej w Międzynarodowym słowniku terminów metrologii prawnej (publikacji wydawanej przez International Organization of Legal Metrology (OIML)), metrologia prawna /ang. legal metrology/ jest to dział metrologii (nauki o pomiarach) odnoszący się do działań, które wynikają z wymagań ustawowych i dotyczą pomiarów, jednostek miar, przyrządów pomiarowych i metod pomiarowych i które przeprowadzane są przez kompetentne organy.

Przedmiot metrologii prawnej może być różny w różnych krajach.

Kompetentne organy odpowiedzialne za działania metrologii prawnej, lub za część tych działań, są zwykle nazywane służbami metrologii prawnej.

Zasadniczym zadaniem metrologii prawnej jest zapewnienie jednolitości pomiarów.

Pojęcia podstawowe:

Czujnik - jest to układ fizyczny lub biologiczny, który swoją reakcją na bodziec fizyczny lub biologiczny przekształca w mierzalny sygnał innej wielkości fizycznej.

Jednostka (jednostka miary, miano) - określona miara danej wielkości służąca za miarę podstawową, czyli wzorzec do ilościowego wyrażania innych miar danej wielkości metodą porównania tych miar za pomocą liczb. Wartość liczbowa takiej miary podstawowej wynosi jeden, stąd jej nazwa - jednostka miary. Konkretnie wartości wielkości można przedstawiać zarówno wielokrotnościami, jak i ułamkami jednostek, a same wartości, o ile to możliwe, mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne.

Dzielnik częstotliwości - samodzielny przyrząd pomiarowy lub część generatora częstotliwości wzorcowej albo miernika częstotliwości służąca do zmniejszenia generowanej lub mierzonej częstotliwości w ściśle ustalonym stosunku liczbowym.

Pomiar:

Pomiar według *Międzynarodowego słownika podstawowych terminów w metrologii – International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (ISO, 2007)* - skrót: *VIM* - jest to zbiór operacji mających na celu wyznaczenie wartości wielkości.

Błąd pomiaru to różnica pomiędzy wynikiem pomiaru a wartością prawdziwą wielkości mierzonej.

Wartość prawdziwa (rzeczywista) wielkości, czyli wartość zgodna z definicją określonej wielkości, jest ze względu na swoją naturę nieznana, stąd też wartość błędu pomiaru jest także nieznana. Problem ten stał się podstawą powstania teorii niepewności pomiaru.

Niepewność pomiaru:

Niepewność pomiarowa to według słownika VIM parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej.

Niepewność pomiaru jest wynikiem oddziaływania szeregu przyczyn, do których można zaliczyć m. in.:

- niepełne uwzględnienie oddziaływania czynników otoczenia (np. temperatury),
- niedoskonałości charakterystyk technicznych przyrządu (histereza, rozrzut wskazań, określona rozdzielczość),
- błędy odczytu ze skal analogowych (błąd paralaksy),
- niedokładność użytych wzorców,
- przyjęte uproszczenia i założenia co do metody pomiaru,
- niedoskonałość realizacyjna definicji mierzonego parametru (np. wykonując pomiar średnicy wałka mikrometrem, poprzez nieprawidłowe ustawienie końcówek pomiarowych mierzy się jedną z cięciw), itp..

Niepewność pomiaru:

Niepewność pomiaru można obliczyć poprzez analizę statystyczną serii wyników pomiarów. Parametrem określającym niepewność pomiaru może być **odchylenie standardowe** otrzymane w serii n pomiarów (próbie n -elementowej):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

gdzie:

x_i – wynik i -tego pomiaru,

$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna z serii n pomiarów,

n – liczba pomiarów.

Niepewność pomiaru:

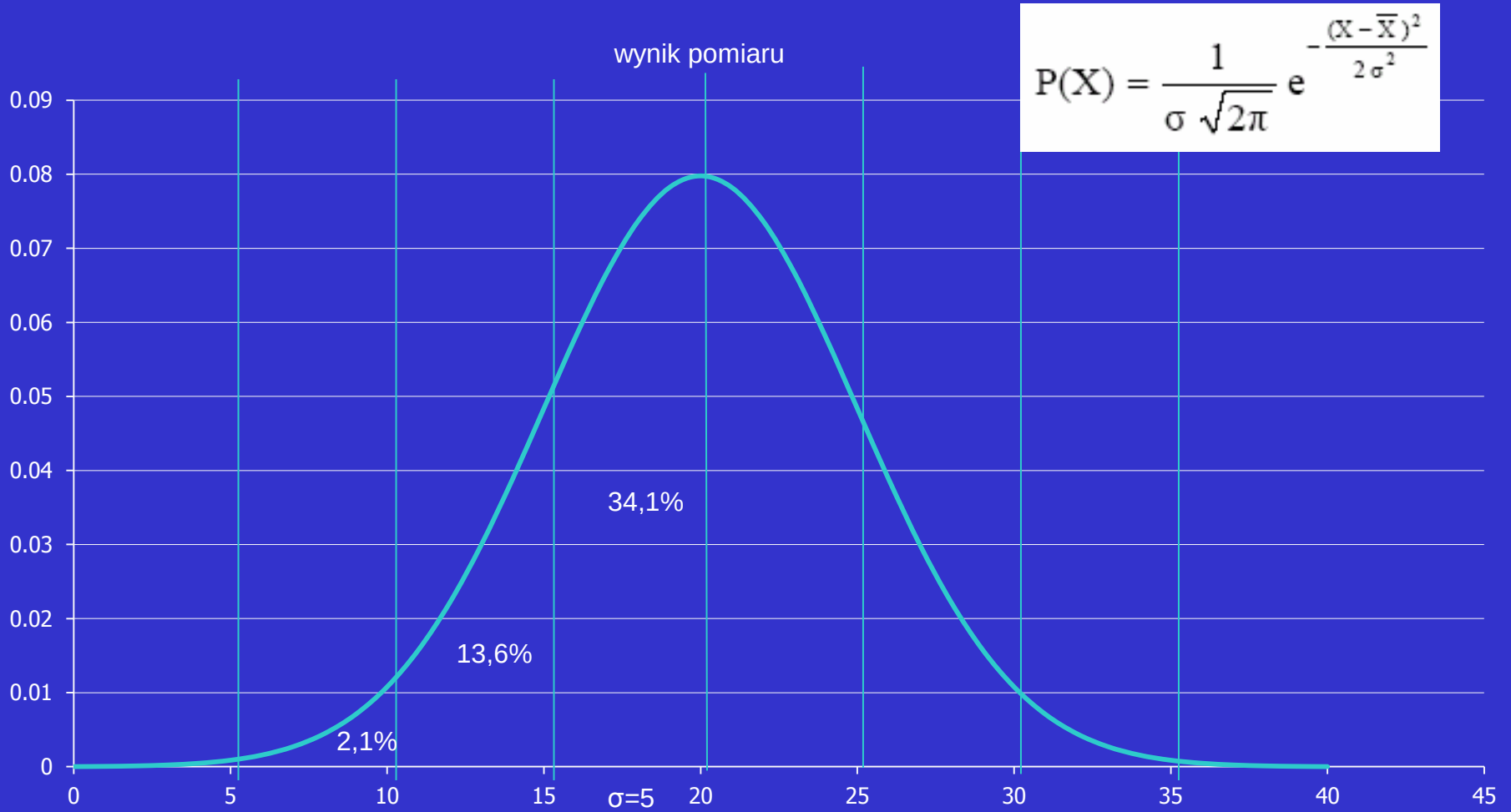
Niepewność pomiaru może być wyrażona jako przedział symetryczny względem wyniku pomiaru, obejmujący (z przyjętym prawdopodobieństwem – tzw. **poziomem ufności P**) wartość prawdziwą wielkości mierzonej. Wówczas, aby wyznaczyć niepewność U należy pomnożyć niepewność wyrażoną odchyleniem standardowym σ przez współczynnik k , zależny od liczby n pomiarów stanowiących podstawę oszacowania odchylenia standardowego, przyjętego poziomu ufności P i rozkładu zmiennej losowej pomiarów:

$$U = k \times \sigma$$

Przykładowo dla najczęściej przyjmowanego poziomu ufności $P=0,95$ (95%) i rozkładu Studenta (rozkład normalny przy większych liczebnościach) :

n	5	10	20	∞
k	2,6	2,3	2,1	1,96

Niepewność pomiaru:



Niepewność pomiaru:

Im liczniejsza próba pomiarowa, tym węższy jest przedział niepewności zawierający z przyjętym prawdopodobieństwem P wartość prawdziwą wielkości mierzonej. Z kolei im wyższy przyjęty poziom ufności P , tym szerszy przedział niepewności (większy współczynnik k).

Uwzględnienie niepewności wyników pomiarów jest niezbędnym elementem w ustaleniu warunków umowy pomiędzy odbiorcą a producentem / wytwórcą wyrobów (w szczególności tego aspektu nie można pomijać w pracach badawczych).

Szczegółowe zasady pozwalające określić kiedy parametry wyrobu lub sprzętu pomiarowego są zgodne lub niezgodne z przyjętą dla tych parametrów tolerancją, czy błędami sprzętu pomiarowego ustalono np. w normie PN-EN ISO 14253 (dla pomiarów długości i kąta) oraz w międzynarodowych normach IEC (sprzęt elektrotechniczny) i IMO (dla urządzeń używanych w żegludze morskiej).

Błędy pomiaru:

W zależności od charakteru występowania błędy pomiaru można podzielić na błędy systematyczne i przypadkowe.

Błąd systematyczny to według VIM różnica pomiędzy średnią z nieskończonej liczby wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonanych w warunkach powtarzalności a wartością prawdziwą wielkości mierzonej.

Błąd przypadkowy to według VIM różnica pomiędzy wynikiem pomiaru a średnią z nieskończonej liczby wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonanych w warunkach powtarzalności.

Błędy pomiaru:

Warunki powtarzalności obejmują:

- tę samą procedurę pomiarową,
- tego samego obserwatora,
- ten sam przyrząd pomiarowy stosowany w tych samych warunkach,
- to samo miejsce,
- powtarzanie w krótkich odstępach czasu.

Przykładem błędów systematycznych mogą być:

- błędy wzorca,
- niedokładności wzorcowania lub kalibracji,
- błędy wykonania podziałki,
- niedokładność przekładni,
- niedokładność charakterystyki pomiarowej, a także błędy wynikające np. z:
 - ugięcia elementów,
 - rozszerzalności cieplnej materiałów w funkcji zmian temperatury.

Błędy pomiaru:

Ponieważ wartość i znak błędu systematycznego nie zmieniają się, można je wyeliminować dodając do wyniku poprawkę C . Wartość poprawki odpowiada sumarycznemu błędowi systematycznemu Δ_s , wziętemu z przeciwnym znakiem:

$$C = -\Delta_s$$

Jeżeli znane są składniki Δ_{s1} , Δ_{s2} , Δ_{s3} ,... błędu systematycznego, to jego wartość sumaryczna Δ_s jest sumą algebraiczną wartości składowych:

$$\Delta_s = \Delta_{s1} + \Delta_{s2} + \Delta_{s3} + \dots$$

Ponieważ błędy te mogą mieć różne znaki, mogą się więc kompensować. Właściwość ta może być wykorzystana w przypadkach, gdy uniknięcie błędów systematycznych bądź kalibracja przyrządu (znacznika, systemu), pomiarowego jest trudna.

Błędy pomiaru:

Błąd przypadkowy nie można uwzględnić jako poprawki, można tylko na podstawie serii pomiarów ustalić z określonym prawdopodobieństwem granice, w których on się znajduje.

Błąd ten powstaje w wyniku działania bardzo wielu trudnych do ustalenia przyczyn, praktycznie niemożliwych do wyeliminowania.

Wartość błędów przypadkowych można zmniejszyć stosując dokładniejszy sprzęt, charakteryzujący się mniejszym rozrzutem wyników pomiaru, stabilizując warunki pomiaru lub przeprowadzając serię pomiarów tej samej wielkości i wyznaczając **średnią wartość wyników pomiarów**. Średnia ta z większą dokładnością określa wartość szukanej wielkości.

Jeżeli znane są cząstkowe błędy przypadkowe Δ_{p1} , Δ_{p2} , Δ_{p3} , ... powstające z różnych przyczyn, błąd sumaryczny Δ_p można obliczyć jako sumę geometryczną tych błędów:

$$\Delta_p = \sqrt{(\Delta_{p1})^2 + (\Delta_{p2})^2 + (\Delta_{p3})^2 + \dots}$$

Błędy pomiaru:

Błędy przypadkowe nie kompensują się, wystąpienie nowej przyczyny powoduje zwiększenie błędu sumarycznego.

Niektóre błędy nie są powtarzalne, a więc nie należą do błędów systematycznych, a jednocześnie mają duże wartości i występują dużo częściej niżby to wynikało z praw rozkładu błędów przypadkowych. Błędy te zwane są **błędami nadmiernymi lub grubymi** – wynikającymi z nieprawidłowego wykonania pomiaru.

Przykładami błędów nadmiernych są: błędny odczyt, pomyłka w zapisie, rozregulowanie układu w trakcie trwania pomiaru, nieprawidłowe usytuowanie przedmiotu mierzonego, błędne obliczenie i wprowadzenie poprawki itp.

Błędy nadmierne należy wyeliminować z serii wyników pomiaru.

Błędy pomiaru:

Wyniki pomiarów, co do wartości, których istnieje podejrzenie, iż są obciążone błędami grubymi należy zbadać przy pomocy testu statystycznego i orzec, czy należy uwzględnić je przy opracowywaniu wyników badań, czy też odrzucić. Algorytm testu F. Grubbsa:

- oszacowanie parametrów x - średniej arytmetycznej i σ – odchylenia standardowego na podstawie wyników pomiarów danej próbki n -elementowej z uwzględnieniem wyniku „podejrzanego”,
- obliczenie statystyk testowych:

$$K_1 = \frac{\bar{x} - x^*}{\sigma} \quad \text{lub} \quad K_2 = \frac{x^* - \bar{x}}{\sigma}$$

- w zależności od tego czy „podejrzany” wynik x^* ma zbyt niską lub zbyt wysoką wartość w odniesieniu do pozostałych,
- porównanie obliczonych wartości K_1 lub K_2 z wartościami krytycznymi dla danej liczności próbki n i przyjętego prawdopodobieństwa $P=1-\alpha$ (poziomu ufności – najczęściej przyjmuje się wartości 0,90; 0,95 lub 0,99).

Błędy pomiaru:

Jeśli obliczona wartość statystyki K_1 lub K_2 jest większa niż wartość krytyczna, należy odrzucić hipotezę, że „podejrzany” wynik należy do tej samej, co pozostałe, populacji.

W sytuacji odwrotnej, można dany pomiar uwzględnić w dalszej analizie.

Wynik pomiaru:

Zapis wyniku pomiaru powinien umożliwiać ocenę dokładności z jaką została określona wartość wielkości mierzonej. W tym celu podaje się jednocześnie z wynikiem pomiaru x wartość błędu Δx_g :

$$x_p = x \pm \Delta x_g,$$

gdzie x_p jest poprawną wartością wielkości x .

Zaleca się obliczania błędu zgodnie z następującymi zasadami:

- wartość liczbowa błędu należy zaokrąglić "w górę" i zapisywać liczbą o jednym miejscu znaczącym, np.: 2; 0,02;
- zapis błędu pomiaru w postaci dwu cyfr znaczących jest zalecany wówczas, gdy wskutek zaokrąglenia do jednej cyfry znaczącej wartość błędu zwiększyłaby się więcej niż o 10%.

Wynik pomiaru oblicza się z jednym miejscem dziesiętnym więcej niż to, na którym zaokrąglono błąd, po czym zaokrągla go się (zgodnie z regułą zaokrąglania liczb) tak, aby ostatnia cyfra wyniku odpowiadała miejscem wartości liczbowej błędu, np.: (121 ± 1) cm, $(19,45 \pm 0,13)$ mA.

Dokładność przyrządów pomiarowych:

Dokładność przyrządu reprezentuje stopień niepewności mierzonej przez niego wielkości, uwzględniając specyfikę środowiska, w którym dokonywane są pomiary oraz inne uwarunkowania.

Specyfikacja dokładności określa więc klasę charakteryzującą dany przyrząd.

Typowym, używanym powszechnie zapisem dokładności przyrządu jest zapis w postaci:

$\pm(\text{procentowy błąd wartości mierzonej} + \text{błąd rozdzielczości pola odczytowego})$

Jednakże, producent może użyć innych sposobów notacji przedstawiającej dokładność instrumentu, co jednoznacznie utrudnia porównywanie przyrządów. Procentowy błąd wartości mierzonej oraz błąd rozdzielczości pola odczytowego czasami może być zastąpiony poprzez podanie dokładności przyrządu w postaci ilości bitów przetwornika A/D lub też jednostek ppm (parts per million).

Dokładność przyrządów pomiarowych:

$$\Delta U = a\% \times U + c\% \times Z$$

gdzie:

U wartość odczytana z miernika,

$a\%$ procentowa wartość dokładności przyrządu (podawanej przez producenta - katalogowa),

$c\%$ błąd rozdzielczości pola odczytowego (c – liczba stanów rozdzielczości przyrządu – nie mylić z cyframi znaczącymi pomiaru),

Z pełny zakres pomiarowy (np. 3Mm w radarze, 10V w mierniku napięcia itp.).

Dokładność przyrządów pomiarowych:

Obliczanie niepewności pomiaru, gdy dokładność podana jest w postaci procentowej zakresu i wartości odczytanej :

$$\text{Niepewność} = [(\% \text{ odczytu} * \text{wartość pomiaru}) + (\% \text{ zakresu} * \text{użyty zakres})]$$

Obliczanie niepewności pomiaru, gdy dokładność podana jest w funkcji procentu pełnej skali przyrządu:

$$\text{Niepewność} = \text{błąd} + \text{ppm} * \text{wartość pomiaru}$$

$$\text{ppm} = 1/1000000$$

Obliczanie niepewności pomiaru, gdy dokładność podana jest w postaci procentowej zakresu:

$$\text{Niepewność} = \% \text{ zakresu} * \text{użyty zakres}$$