

OCENA WIAROGODNOŚCI SYSTEMU POMIAROWEGO

Ryszard Kłós

Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

STRESZCZENIE

Podejmowanie decyzji w sytuacjach problemowych opiera się o aktualne i rzetelne informacje. Wiele z nich ulega szybkim zmianom, stąd będące w posiadaniu informacje mogą być przestarzałe lub zmanipulowane w celu wymuszenia błędnych decyzji. Istotnym jest posiadanie możliwości oceny pozyskiwanych informacji. Aby zapewnić im wiarygodność, najlepiej pozyskiwać je w drodze własnego procesu pomiarowego. W takim przypadku ocena wiarygodności systemu pomiarowego wydaje się kluczowa. W artykule opisano ogólnie podejście do oceny wiarygodności systemów pomiarowych.

Słowa kluczowe: analiza GR&R, odtwarzalność systemu pomiarowego, powtarzalność systemu pomiarowego.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2015 Vol. 51 Issue 2 pp. 31-46

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.1515/phr-2015-0009

Strony: 16, rysunki: 6, tabele: 1

page **www** of the periodical: www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 18.04.2015r.

Termin zatwierdzenia do druku: 27.05.2015r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

WSTĘP

Artykuł jest kontynuacją¹ rozpoczętej już dość dawno, na łamach *Polish Hyperbaric Research*, dyskusji na temat metody oceny wiarygodności systemów pomiarowych bez wykorzystania materiałów odniesienia – *Gage R&R*² [1,2]. Metody *Gage R&R* są próbą wykorzystania metod stochastycznych³ do poszukiwania źródeł zmienności wyników pomiarów realizowanych przez systemy pomiarowe a wpływających później na poziom ich wiarygodności, który powinien odpowiadać wymaganiom jakościowym *CTQ*⁴.

W piśmiennictwie na temat metod *Gage R&R* można rozróżnić dwa nurty. Pierwszy to opracowania użytkowe [3] a drugi grupuje wyczerpujące analizy statystyczne [4,5]. Niewiele z prac na temat metod *Gage R&R* odnosi się do oceny wiarygodności procesu pomiarowego poprzez porównanie z materiałami odniesienia, które to metody są raczej domeną prac z zakresu metrologii [6].

W artykule zostanie przybliżona ocena wiarygodności systemu pomiarowego metodami *Gage R&R* wykorzystującymi etalony będące wzorcowymi materiałami odniesienia wartości poprawnych $\hat{\mu}$ dla różnych wielkości fizykochemicznych X .

Przez wartość poprawną $\hat{\mu}$ należy rozumieć liczbowe oszacowanie odtwarzanej przez etalon wielkości, obciążone zaniedbywalnymi błędami systematycznymi⁵ ε_s z punktu widzenia określonych zastosowań. Wynika stąd, że choć odtwarzana wartość poprawna $\hat{\mu}$ jest obciążona szczerkowymi błędami systematycznymi ε_s , to w danych zastosowaniach⁶ może być uważana za dostatecznie dobre⁷ oszacowanie wartości prawdziwej⁸ μ .

METODA

System pomiarowy

We wcześniejszych pracach wspomniano już, że przy ocenie systemu pomiarowego⁹ niezwykle ważna jest zarówno ocena wiarygodności przyrządu i wyposażenia pomiarowego¹⁰ jak i procedur postępowania *SOP*¹¹ [1,2]. Pomimo znacznego postępu, systemy pomiarowe wykorzystują najczęściej takie same zjawiska fizykochemiczne. Bez zmian sensorów, wykorzystanie unowocześnionych elektronicznych systemów wsparcia procesu pomiarowego ma jedynie ograniczony wpływ na dotychczas spotykane ograniczenia metod pomiarowych.

Wiedza o zjawiskach fizykochemicznych leżących u podstaw działania wykorzystywanych sensorów jest kluczowa w ocenie możliwości zwiększania wiarygodności systemów pomiarowych. Nadal aktualna jest tradycyjna wiedza metrologiczna¹², która jest ciągle unowocześniana i poszerzana.

Dokładne pomiary wymagają stosunkowo częstej kalibracji systemów pomiarowych za pomocą etalonów¹³. Wzorcowanie¹⁴ może stanowić także perspektywny sposób oceny zdolności procesu pomiarowego¹⁵ znajdując swe główne zastosowanie w metrologii prawnej¹⁶, przy kalibracji przyrządów pomiarowych¹⁷, do zastosowań przy odpowiedzialnych pomiarach¹⁸ itp. Wyróżnia się kilka rodzajów metod wykorzystujących etalony: porównania z wzorcem, krzywej wzorcowej, itp. [7].

Metody wykorzystujące wzorcowe materiały odniesienia nie zawsze są opłacalne¹⁹ lub nie mogą być zastosowane, jak w metodach retrospektywnych²⁰. Sprawdzenie poprawności działania systemu pomiarowego *post factum* poprzez porównanie z wzorcami nie powinno służyć do wnioskowania o jakości wcześniejszej pracy systemu.

W procesie wzorcowania wykorzystuje się etalony danej wielkości fizykochemicznej X charakteryzujące się przypisaną i uznaną²¹ wartością dla tej wielkości fizykochemicznej, wyznaczoną z niepewnością akceptowalną dla konkretnych zastosowań²² – wartość poprawna $\hat{\mu}$.

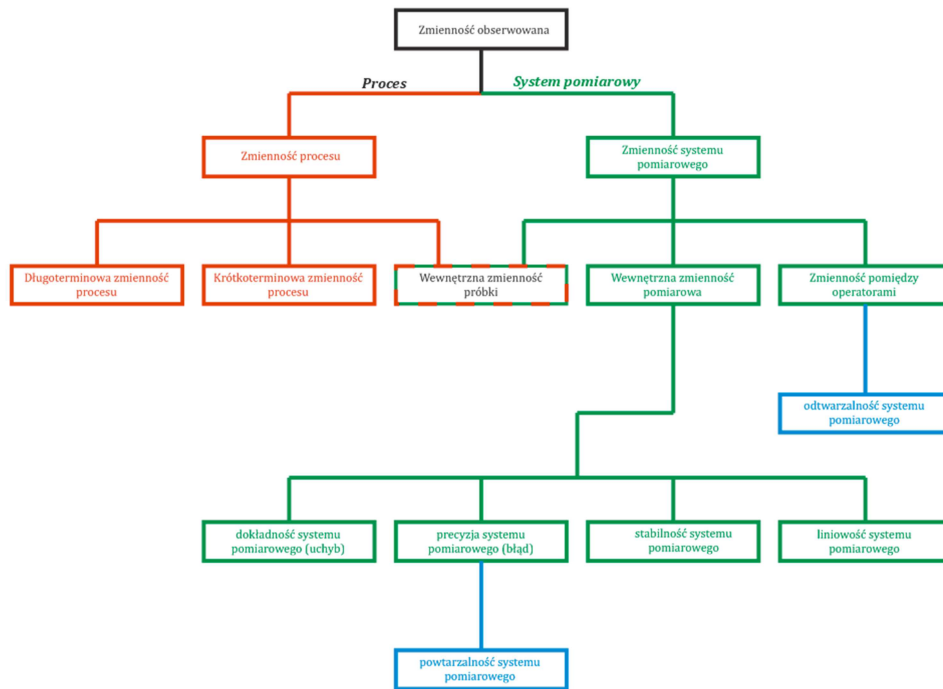
Kalibracja na podstawie etalonów wartości poprawnych $\hat{\mu}$ prowadzi do minimalizacji błędów systematycznych ε_s , pozwalając na utrzymanie²³ wymagań jakościowych *CTQ*²⁴ dla systemu pomiarowego.

Metodyki *Gage R&R* niewykorzystujące etalonów nie mogą zapewnić tych samych możliwości oceny różnych źródeł błędów systematycznych. Przygotowanie systemów pomiarowych bez wykorzystania etalonów zapewnia jedynie minimalizowanie uchybu związanego z odtwarzalnością i powtarzalnością pomiarów – rys. 1.

Uchyby związane z liniowością skali²⁵ czy stabilnością w czasie²⁶ są określane poprzez badania metrologiczne z wykorzystaniem etalonów i najczęściej można je znaleźć w świadectwie sprawdzenia metrologicznego systemu pomiarowego. Ich wyznaczenie najczęściej jest możliwe tylko przy wykorzystaniu etalonów.

Kompensacja różnego rodzaju uchybów jest najczęściej dokonywana na drodze wykorzystania dobrej praktyki laboratoryjnej *SOP*, które można czerpać z zaleceń producentów, podręczników metrologicznych czy opracowań naukowych [8,7].

Przy ocenie systemu pomiarowego należy brać pod uwagę odtwarzalność i powtarzalność związaną z pracą przy różnych dopuszczalnych modyfikacjach systemu pomiarowego²⁷, w tym również zmian obsługi – rys. 1.



Rys. 1. Rodzaje obserwowanej zmienności procesu oraz nakładającej się zmienności samego systemu pomiarowego [9].

Odtwarzalność i powtarzalność

Ocena wiarygodności procesu pomiarowego, zarówno przy wykorzystaniu jak i bez wykorzystania etalonów²⁸, możliwa jest na podstawie oceny niepewności związanej z odtwarzalnością²⁹ i powtarzalnością³⁰ pomiarową.

Odtwarzalność i powtarzalność może być oszacowana przez analizę historycznych danych z pomiarów³¹ – metoda retrospektywna. W tym przypadku powtarzalność charakteryzuje potencjalne możliwości procesu pomiarowego³², natomiast odtwarzalność charakteryzuje praktycznie osiągalną zdolność procesu przy wykorzystaniu konkretnego przyrządu, zastosowaniu standardowych procedur SOP oraz dobrej praktyki laboratoryjnej GLP³³.

Zmienność związana z odtwarzalnością jest obserwowana przy pomiarach dla tej samej próbki realizowanych przez różnych analityków lub/i modyfikacjach systemu pomiarowego.

Zaś powtarzalność stanowi obserwowaną zmienność wyników pomiarów dla tej samej próbki, przy realizacji pomiarów przez tego samego analityka, przy pomocy tego samego instrumentu pomiarowego i w niezbyt odległych odstępach czasowych³⁴ – rys. 1.

Metody oceny systemu pomiarowego

Rozwój metod oceny wiarygodności³⁵ procesu pomiarowego wymuszany jest przede wszystkim przez przemysł produkcji wielkoseryjnej i masowej [3]. Do najważniejszych metod należą metodyki oceny zdolności procesu R&R³⁶ [1].

Metody stosowane w metrologii odnoszą się do wykorzystania odniesienia wyników pomiaru do łańcucha etalonów wartości poprawnych. Dzięki temu można za ich pomocą oszacować propagację prawie wszystkich składowych szacunkowej niepewności systematycznej³⁷ wyrażanej przez błędy systematyczne³⁸. Błąd systematyczny ϵ_s stanowi różnicę pomiędzy ustaloną wartością wielkości mierzonej z pomiarów $X \leftarrow x$ a przyjętą do porównania wartością poprawną³⁹ $\hat{\mu}$, najczęściej wyrażany różnicą pomiędzy wartością średnią z wykonanych pomiarów \bar{x} a wartością poprawną $\hat{\mu}$: $\epsilon_s = \bar{x} - \hat{\mu}$. Często odtwarzalność jest utożsamiana z niepewnością systematyczną.

Należy rozróżniać odtwarzalność wyznaczaną dla etalonu wartości poprawnej $\hat{\mu}$, która nie powinna być utożsamiana z odtwarzalnością, związaną z 1-krotnym powtarzaniem pomiaru $X \leftarrow x_1$ tej samej próbki X o nieznaney lub jedynie szacowanej w przybliżeniu wartości poprawnej $\sim \hat{\mu}$.

Zastosowanie metod statystyki matematycznej pozwoliło na opracowanie sposobów ewaluacji⁴⁰ systemów pomiarowych na podstawie pomiaru tych samych próbek pochodzących z ustabilizowanego lub wolnozmiennego procesu⁴¹ poprzez oszacowanie i oddzielenie zmienności procesu pomiarowego oraz zmienności⁴² measuranda⁴³ i na tej podstawie oszacowanie odtwarzalności i powtarzalności dla systemu pomiarowego.

Analiza R&R jest uproszczoną metodą oceny systemu pomiarowego w stosunku do metod stosowanych w metrologii⁴⁴ [6,7,1]. Lecz przy jej zastosowaniu można dokonać oceny systemu pomiarowego przy braku wzorców lub niemożliwości ich aplikacji [7]. Jednak taka ocena nie pozwala już na oszacowanie wszystkich źródeł szacunkowych błędów systematycznych ϵ_s dla systemu pomiarowego – tab. 1 [6].

Sugerowane metody stosowane przy ocenie wiarygodności systemu pomiarowego w zależności od rodzaju pomiaru i dostępności wzorca wartości poprawnej $\hat{\mu}$, na podstawie⁴⁵ [6].

Dostęp do wzorca wartości poprawnej	Rodzaj pomiaru	
	Niszczące	Nieniszczące
dostępny	porównanie z wzorcem wartości poprawnej	porównanie z wzorcem wartości poprawnej
niedostępny	metoda <i>crossed R&R</i> *)	metoda <i>nested R&R</i> **)

*)metoda nie pozwala na oszacowanie wszystkich składowych błędów systematycznego systemu pomiarowego ε_s umożliwiając jedynie na oszacowanie niepewności związanej z odtwarzalnością i powtarzalnością
 **)metoda nie pozwala na oszacowanie zmienności związanej z powtarzalnością i odtwarzalnością, lecz jedynie na oszacowanie niepewności pomiaru jako całości – z tego powodu mogłaby być tu formalnie pominięta

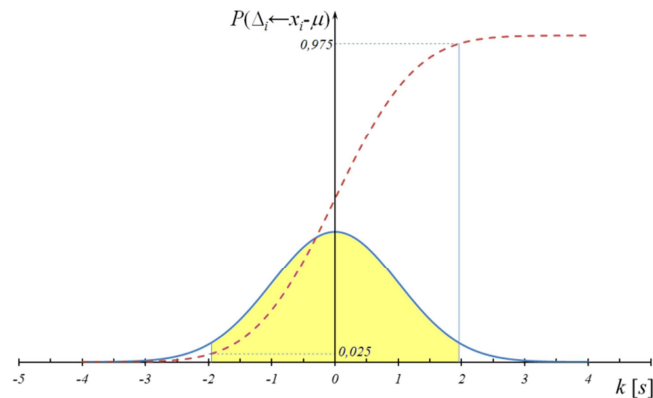
DYSKUSJA

Ogólna ocena wiarygodności systemu pomiarowego

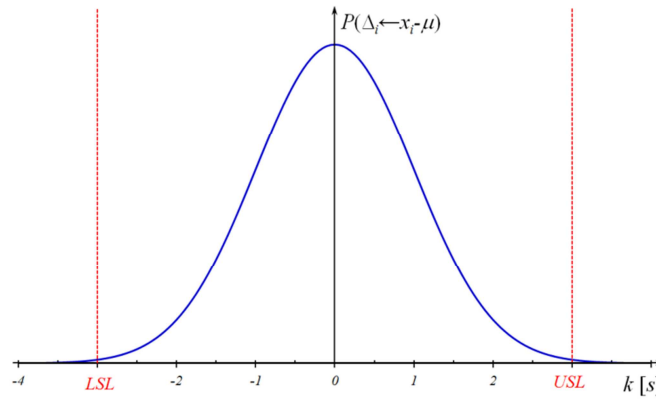
Ogólne podejście do oszacowania wiarygodności procesu pomiarowego przy wykorzystaniu procedur *R&R* bez i z użyciem etalonów stanowi określenie proporcji osiągniętej precyzji pomiarowej do zakresu tolerancji *PTR*⁴⁶, definiowany jako (5):

$$PTR = k \cdot \frac{s}{USL - LSL} < 0,1 \quad | \quad s = \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{x}_i - \hat{\mu}_i)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

gdzie: *PTR* – stosunek osiągniętej precyzji pomiarowej do zakresu tolerancji reprezentujący wymagania jakościowe *CTQ* dla systemu pomiarowego, *k* – współczynnik rozszerzenia, najczęściej przyjmowane są dwie wartości $k \in \{5,15; 6\}$, *s* – odchylenie standardowe od wartości poprawnej, *USL* i *LSL* – odpowiednio, górna i dolna granica specyfikacji będąca wymaganiem jakościowym *CTQ* dla systemu pomiarowego, *i* – liczba wzorców, \bar{x}_i – wartość średnia z *l* pomiarów dla *i* – tego wzorca, $\hat{\mu}_i$ – wartość poprawna dla *i* – tego wzorca, *n* – całkowita liczba replikacji składająca się ze wszystkich kombinacji liczby modyfikacji systemu *m* systemu pomiarowego, liczby wzorców *i* oraz replikacji *l* dla każdego wzorca *i*: $n = \sum_i l_i \cdot m_i$.



Rys. 2. Teoretyczny przedział pokrycia dla odchyżeń $\Delta_i = \bar{x}_i - \mu_i$ średniej \bar{x}_i z $n_i = l_i \cdot m_i$ replikacji związanych z powtórzeniami *l* i modyfikacjami systemu *m* przy realizacji pomiarów dla wzorca *i* na technicznym poziomie dokładności odpowiadającym prawdopodobieństwu na poziomie ok. $P(x_i - \mu) \cong 95\%$ prawdopodobieństwa całkowitego tworzący symetryczny przedział dla wartości $k \in (-1,96; 1,96)s$.



Rys. 3. Teoretyczny przedział pokrycia dla odchyień $\Delta_i = \bar{x}_i - \mu_i$ średniej \bar{x}_i z $n_i = l_i \cdot m_i$ replikacji związanych z powtórzeniami l i modyfikacjami systemu m przy realizacji pomiarów dla wzorca i jako przedział pokrycia pomiarowego dla sześciokrotnej wartości $k = 6 \cdot s$ obserwowanego odchylenia standardowego s stanowiący ok. 99,73% prawdopodobieństwa wystąpienia różnicy Δ_i : $P(x_i - \mu) \cong 99,73\%$.

Współczynnik rozszerzenia k jest liczbą wyrażoną w jednostkach obserwowanego odchylenia standardowego $[k] = s$ składającą się na niepewność rozszerzoną u szacowaną, jako: $u = k \cdot U$, gdzie U jest niepewnością standardową szacowaną z wariancji wyników pomiarów zrealizowanych przez system pomiarowy. Niepewność rozszerzona określa przedział ufności $\Delta(P) \equiv \pm u$ na poziomie ufności P dla wyników pomiarów. Tak skonstruowany przedział ufności jest typowym sposobem szacowania niepewności dla replikowanego pomiaru [1].

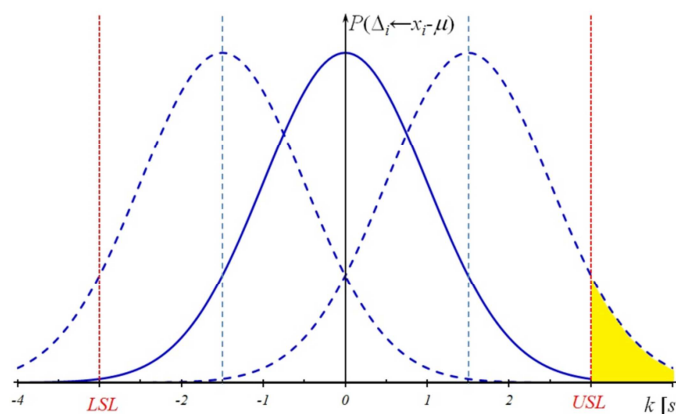
Przy pomiarach wartości odniesienia odtwarzanych przez etalon i odchylenia $\Delta_i(P)$ szacowane są z obserwowanych odchyień wartości średnich \bar{x}_i z pomiarów⁴⁷ x_i od odtwarzanej przez etalon wartości poprawnej $\hat{\mu}_i$. Jeśli zmienność pochodząca od błędów systematycznych ε_s jest znacznie mniejsza $\varepsilon_s \ll \varepsilon_r$ od udziału zmienności wnoszonej przez błędy przypadkowe ε_r , to odchylenia $\Delta_i = \bar{x}_i - \mu_i$ średniej \bar{x}_i z $n_i = l_i \cdot m_i$ replikacji związanych z powtórzeniami l i modyfikacjami systemu m przy realizacji pomiarów $X \leftarrow x_i$ dla wzorca i od jego wartości poprawnej $\hat{\mu}_i$ powinny mieć rozkład normalny, gdyż stanowią w znacznej większości reprezentację zmienności związanej jedynie z propagacją błędów przypadkowych ε_r .

Aby rozkład ten miał wartość centralną w punkcie $k = 0$ muszą zostać całkowicie skompensowane zmienności wnoszące stały wkład z błędów systematycznych ε_s powodujących przesunięcie centrum od wartości $k = 0$ w formie poprawki – patrz dalej na rys. 6.

Współczynnik rozszerzenia k dobierany jest zależnie od preferowanej metody. W metrologii pole reprezentujące prawdopodobieństwo wystąpienia różnicy $x_i - \mu$ stanowiące $P(x_i - \mu) \cong 99\%$ całkowitego pola pod krzywą Gaussa, reprezentującego zdarzenie pewne, jest powszechnie przyjmowane za zadawalające dla klasy pomiarów laboratoryjnych.

Dla takiego podejścia współczynnik rozszerzenia kształtuje się na poziomie $k \cong 5,15 \cdot s$. Dla pomiarów technicznych przedział ufności przyjmowany jest na poziomie $P(x_i - \mu) \cong 95\%$ a wtedy współczynnik rozszerzenia k leży na poziomie $k \cong 3,92 \cdot s$ – rys. 2. Współczynnik $k = 6 \cdot s$ jest zgodny z podejściem nazywanym *Six – Sigma* [10] – rys. 3.

Można uznać, że tak skonstruowane przedziały ufności, nazywane czasami przedziałami pokrycia dla zdolności pomiarowej systemu pomiarowego, stanowią granicznie niską wiarygodność dla tego systemu. Im większy przedział wokół obserwowanego rozproszenia metody pomiarowej tym łatwiej jest za jego pomocą rozróżnić i klasyfikować mierzone cechy.



Rys. 4. Zobrazowanie prawdopodobieństwa związanego z przekroczeniem górnej granicy tolerancji USL spowodowane przyjętymi maksymalnymi fluktuacjami błędów systematycznych na poziomie $\varepsilon_s^{max} = \pm 1,5 \cdot s$.

Z doświadczenia wynika, że dla ustabilizowanych procesów obserwuje się jednak fluktuacje związane z występowaniem błędów systematycznych ε_s powodujące maksymalne przesunięcie w rzetelności odtwarzania wyników pomiaru od średniej \bar{x} o przyjmowaną wartość maksymalną $\varepsilon_s^{max} = 1,5 \cdot s$.

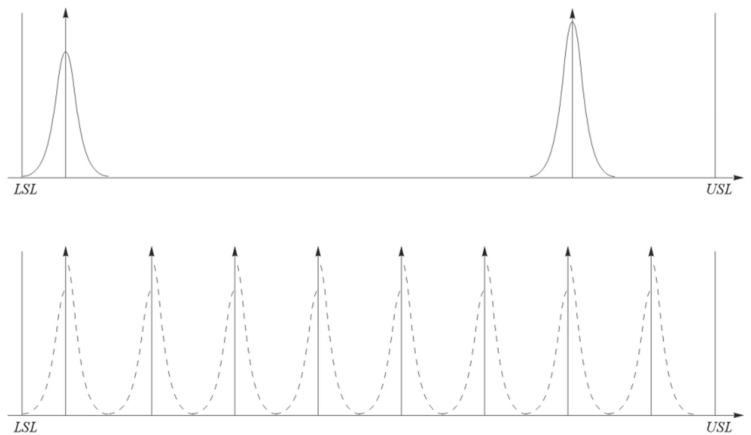
Przy takim założeniu wartość średnia może odchylić się o wartość ε_s^{max} w obie strony $\bar{x} \pm 1,5 \cdot s$. Pozostawiając granice tolerancji $[LSL; USL]$ na tym samym poziomie, jak na rys. 3 spowoduje to, że przy maksymalnej wartości błędów systematycznego ε_s^{max} część pola leżąca poza jedną z granic tolerancji $[LSL; USL]$ odcinać będzie prawdopodobieństwo na poziomie: $P(x_i - \mu) \cong 6,67\%$ – rys. 4

Przy eksperymentalnym wyznaczaniu stosunku osiągniętej precyzji pomiarowej do zakresu tolerancji PTR należy dążyć do równomiernego pokrycia wzorcami i wymaganego zakresu pomiarowego⁴⁸ $[USL; LSL]$. Pomiar każdego wzorca powinien być realizowany poprzez jego wielokrotną replikację $l > 5$, przy kilku możliwych modyfikacjach⁴⁹ systemu pomiarowego $m > 2$, w tym przy uwzględnieniu pracy różnych operatorów. Tak zbudowany plan powinien być randomizowany⁵⁰.

Jeśli system pomiarowy nie wymaga obsługi, to należy pomiary grupować i realizować w znaczących odstępach czasu pomiędzy grupami w dopuszczalnych, lecz różniących się warunkach, przy różnych stopniach naładowania integralnego zestawu akumulatorów, przy zastosowaniu różnych dostępnych wersji oprogramowania, dopuszczalnych modyfikacji systemu, różnych porach dnia, miejscach⁵¹ itp., także z uwzględnieniem procesu randomizacji dla tych modyfikacji.

Zależność [1] odzwierciedla ogólnie przyjmowane założenie, że system pomiarowy powinien zapewnić rozróżnienie przynajmniej 10 różnych wartości dla przewidywanego zakresu oczekiwanej zmienności measuranda, jako jedno z wymagań jakościowych CTQ dla procesu pomiarowego.

Na rys. 5 pokazano przykład oceny wartości stosunku PTR osiągniętej precyzji pomiarowej do zakresu tolerancji przy wykonaniu pomiarów dla dwóch wzorców i podejściu *Six – Sigma*. Rozproszenie obserwowane dla etalonów stanowiło miarę do określenia krotności pokrycia przedziału tolerancji $[LSL; USL]$.



Rys. 5. Zobrazowanie oceny wartości stosunku precyzji do tolerancji PTR dla systemu pomiarowego (dolny rysunek) przy współczynniku rozszerzenia $k = 6 \cdot s$ i zakresie tolerancji $[LSL; USL]$, dla którego wykonano pomiary dla dwóch wzorców (górny rysunek). Z przeprowadzonych wyliczeń wynika jedynie ok. ośmiokrotne pokrycie przedziału tolerancji $[LSL; USL]$, stąd system nie spełnił wymogów zależności [1].

Prawie połowa pola pod krzywą Gaussa zawiera się w odległości od centrum w ok. $k \cong 3 \cdot s$. Stąd średnia dla dwóch wzorców będzie zobrazowana przez złożenie połówek krzywych rozkładu odpowiednio po jednej od każdego wzorca. Tak otrzymany średni przedział precyzji metody pomiarowej stanowił miarę do przemierzenia zakresu tolerancji.

Z przeprowadzonych na rys. 5 wyliczeń wynika, że ponad ośmiokrotnie pokryto przedział tolerancji. Zgodnie z zależnością [1] system nie spełnia jednak przyjętych wymogów jakościowych CTQ dla założonego zakresu zmienności measuranda.

Zależność [1] obrazuje znaną zasadę mnemotechniczna stanowiącą, że dokładność pomiarowa powinna być przynajmniej o rząd wielkości większa niż wymagany przewidywany zakres zmienności measuranda, dla którego należy wykonywać pomiary. Stąd wartość stosunku osiągniętej precyzji pomiarowej do zakresu tolerancji PTR z zależności [1] powinna być mniejsza od $PTR < 0,1$.

Ocena systemu pomiarowego oparta na wzorcu

Powszechnie w metrologii stosuje się oszacowanie błędu bezwzględnego Δ wyniku pomiaru w postaci średniej arytmetycznej \bar{x} będącej estymatorem⁵² wartości prawdziwej μ z wykonanych n pomiarów: $\Delta = k \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot k \cdot u \Rightarrow \Delta = \frac{\bar{x}}{u}$, gdzie s jest odchyleniem standardowym obliczonym na podstawie wyników otrzymanych w cyklu pomiarowym zaś u jest błędem standardowym. Dobór wartości k dla pomiarów technicznych zobrazowano wcześniej na rys. 2.

Ogólnie, odchylenia $\Delta = \bar{x} - \mu$ średniej \bar{x} z l replikacji pomiarów $X \leftarrow x_l$ od wartości prawdziwej μ powinny mieć rozkład normalny, gdyż powinny reprezentować jedynie błąd przypadkowy. Na podstawie tego rozkładu dobierany jest współczynnik rozszerzenia k . Jednak często do dyspozycji są jedynie wyniki z małej próby $n < 30$, wtedy przyjmuje się wartość współczynnika rozszerzenia k dobieranego na podstawie rozkładu t – Studenta.

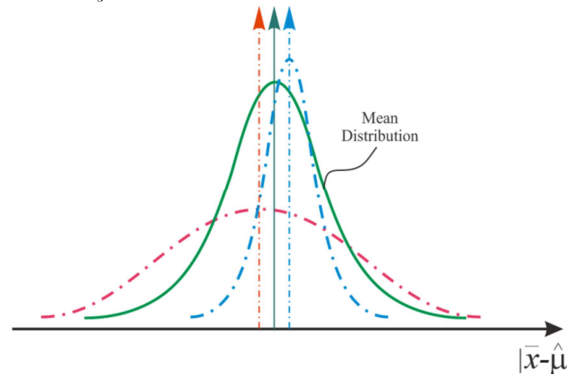
Dla liczności próbek $n \geq 30$ przyjmuje się, że różnice pomiędzy rozkładem t – Studenta i rozkładem normalnym są do zaniebawania w znakomitej większości sytuacji problemowych i można przyjmować współczynnik k na podstawie rozkładu normalnego.

Dla pomiarów technicznych i rozkładu normalnego przyjmuje się najczęściej wartość współczynnika rozszerzenia $k = 2$. Istnieje mnemotechniczna reguła stanowiąca, że rezultatu⁵³ \bar{x} cyklu pomiarowego⁵⁴ powinien być przynajmniej o rząd wielkości lepszy od jego niepewności, wyrażonej za pomocą błędu bezwzględnego Δ : $\frac{\bar{x}}{\Delta} \gg 10$.

Przyjmując założenie, że pomiarem jest wartość ważonego błędu bezwzględnego $\bar{\Delta}$ z pomiarów i wzorców obliczona jako średnia $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{n}$ z wartości bezwzględnych różnic $\Delta_i = |\bar{x}_i - \hat{\mu}_i|$ średnich \bar{x}_i z l replikacji pomiarów $X \leftarrow x_n$ dla wszystkich modyfikacji systemu pomiarowego n , to analogicznie jak wyżej, błędem bezwzględnym tej wartości $\bar{\Delta}$ będzie iloczyn $k \cdot u$, gdzie u jest niepewnością standardową $u = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot s$.

Ponieważ wspomniano wcześniej, że rozsądną minimalną wartością współczynnika rozszerzenia k jest $k = 2$, to wracając do reguły mówiącej o tym, że wartość mierzona powinna być o rząd wielkości większa od błędu bezwzględnego tej wartości, można zapisać: $\forall_{n \geq 30} \Rightarrow k=2 \quad \frac{\bar{\Delta}}{k \cdot u} \gg 10 \Rightarrow \frac{\bar{\Delta}}{u} \gg 5$.

Na tej podstawie oszacowano wartość wskaźnika oceny wiarygodności systemu pomiarowego dla metody wykorzystującej etalony, jako parametr będący stosunkiem średniego błędu bezwzględnego $\bar{\Delta}$ do estymowanej średniej wartości jego odchylenia standardowego \bar{s} : $\frac{\bar{\Delta}}{\bar{s}}$ [6].



Rys. 6. Odchylenia $|\bar{x}_i - \hat{\mu}_i|$ dla $i = 2$ wzorców wartości poprawnych $\hat{\mu}_i$ oraz rozkład ich wartości średniej $\frac{1}{n} \cdot \sum_i |\bar{x}_i - \hat{\mu}_i|$.

$$\frac{\bar{\Delta}}{u} \gg 5 \quad \left| \quad \bar{\Delta} = \frac{\sum_i |\bar{x}_i - \hat{\mu}_i|}{n}; u = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot s = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{x}_i - \hat{\mu}_i)^2}{n-1}} \right. \quad (2)$$

gdzie: $\bar{\Delta}$ – średnie odchylenie od wartości poprawnych $\hat{\mu}_i$ dla i wzorców; u – niepewność standardowa obliczona dla wszystkich wzorców i .

Ze swej natury reguła [2] stanowi analizę wariancji wykonaną w taki sam sposób jak wykonuje się oszacowanie niepewności pomiarowej, gdzie wynikami pomiarów są wartości bezwzględne odchylenia $|x_{n,i} - \hat{\mu}_i|$ wyników pomiaru $x_{n,i}$ od wartości poprawnej measuranda $\hat{\mu}_i$.

Uśrednienie odchyleń jest w tym przypadku uzasadnione, gdyż zmienne kumulują w sobie jedynie dopuszczalne różnice w modyfikacji systemu pomiarowego, które mogą być zaniedbywane z punktu widzenia wymagań jakościowych CTQ dla procesu pomiarowego – rys. 6.

Taki dobór zmiennych powinien w większości przypadków zapewniać ich rozkład normalny. Jeśli podczas obligatoryjnego sprawdzenia rozkładu odchyleń $|x_{n,i} - \hat{\mu}_i|$ okaże się, że jest on zaburzony to należy podejrzewać występowanie nadmiernych błędów systematycznych⁵⁵.

Powodowane przez obecność błędów systematycznych deterministyczne zaburzenie należy wprzódy zidentyfikować i zminimalizować, nim przystąpi się powtórnie do analizy wiarygodności procesu pomiarowego.

Poszukiwanie źródeł błędów systematycznych jest możliwe jedynie, jeśli dysponuje się etalonami odtwarzającymi wartości poprawne $\hat{\mu}_i$ dla mierzonych wielkości.

WNIOSKI

Zależność [1] stanowi przesłankę mówiącą o zdolności procesu pomiarowego do pokrycia zakresu spodziewanych zmian measuranda, zaś nierówność [2] stanowi przesłankę określającą spełnienie wymagań jakościowych dla każdego pojedynczego pomiaru. Dla systemu pomiarowego spełniającego wymagania jakościowe CTQ warunki [1] i [2] powinny być spełnione równocześnie.

Wypełnienie jedynie warunku [1] wyrażanego przez stosunek precyzji do tolerancji PTR, który może leżeć poniżej wartości $PTR < 0,1$ i tym samym wypełnić wymagania jakościowe CTQ dotyczące możliwości rozróżniania mierzonej cechy jest niewystarczające. Równocześnie ze spełnieniem warunku [1] wartość stosunku [2] średniego błędu bezwzględnego $\bar{\Delta}$ do jego niepewności standardowej u może leżeć poniżej wartości $\frac{\bar{\Delta}}{u} < 5$ i system nie będzie zapewniał wymaganej precyzji z aprobowaną wiarygodnością. Podobnie wypełnienie warunku [2] spowoduje, że precyzja pomiaru będzie zapewniona, lecz jednocześnie proces pomiarowy może nie zapewniać pokrycia wymaganego przedziału pokrycia i tym samym nie wypełnić warunku ⁵⁶ [1].

Informacji na temat wiarygodności systemu pomiarowego można oczekiwać od producenta, wnioskując o jego deklarację w tym zakresie. Często deklarowane przez producenta wartości mogą być poprawione poprzez zastosowanie odpowiednich procedur postępowania SOP, gdyż zazwyczaj producent w swej deklaracji podaje wartości uzyskane przeciętnie i wybrane metodą najgorszych okoliczności.

Dla wyznaczenia rzeczywistych wartości metrologicznych systemu pomiarowego należy już przeprowadzić badania metrologiczne. Są one kosztowne, nie tylko ze względu na ponoszone wydatki na ich przeprowadzenie, lecz w większości wypadków wymagają także poniesienia kosztów inwestycyjnych zakupu systemu pomiarowego.

Firmy rzadko zgadzają się na wypożyczenie systemów pomiarowych celem przeprowadzenia badań metrologicznych. Z tego powodu ten etap prac jest często pomijany doprowadzając do kosztownego rozczarowania podczas eksploatacji systemu pomiarowego.

Zaproponowane do wykorzystania wskaźniki [1]-[2] wypełnienia wymagań jakościowych CTQ dla systemu pomiarowego są użyteczne, choć ich stosowanie jest pojęciowo zagmatwane. Naturalną, samo tłumaczącą się metodą oceny

systemów pomiarowych jest wyznaczenie przedziałów ufności dla szacowanych metodami analizy wariancji frakcji obserwowanego rozproszenia [4].

Jednak taki sposób podejścia jest rzadko stosowany w analizie systemów pomiarowych, jak i podczas wnioskowania statystycznego [11]. Prawdopodobnie jest to spowodowane koniecznością świadomego przyjmowania poziomu mocy wnioskowania pociągającej za sobą świadomość stosunkowo dużych, niemożliwych do zaakceptowania wartości błędów drugiego rodzaju dla małych próbek.

Jeśli badania metrologiczne ujawnią nieaprobowaną wartość błędów drugiego rodzaju, to badania powinny być powtórzone dla większej populacji, podrażając znacznie koszty badań, narażając badaczy na niezadowolenie własne, sponsorów, kierownictwa itd. Często, z niewiedzy lub dla świętego spokoju, są one pomijane lub utajniane przez badaczy. Przy projektowaniu systemów zachowania życia takie cyniczne zaniechania lub brak dostatecznej wiedzy mogą okazać się dramatyczne w skutkach.

Publikacja zawiera efekty przeprowadzonych badań w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, finansowanych ze środków na naukę w latach 2013 – 2015 w ramach projektu rozwojowego pt. "Projektowanie dekompresji dla nurkowań MCM" o numerze umowy DOBR/0047/R/ ID1/2012/03.

BIBLIOGRAFIA

1. Kłos R. Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej - Skrypt. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-26.
2. Jakus B., Kłos R. Zdolność procesu pomiarowego. Polish Hyperbaric Research. 2007, Tom 19, ISSN 1734-7009, strony 33-46.
3. Automotive Industry Task Force. Measurement systems analysis Reference Manual. Fourth Edition. brak miejsca : Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2010. ISBN 978-1-60-534211-5.
4. Burdick R.K., Borror C.M., Montgomery D.C. Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. ISBN 0-89871-588-1.
5. Montgomery D.C. Statistical quality control. 6th Edition. New York : John Wiley & Sons Inc., 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.
6. Allen T.T. Introduction engineering statistics and Six Sigma. London : Springer Ltd., 2006.
7. Kłos R. Metoda pomiarów składu mieszanin oddechowych w nurkowych kompleksach hiperbarycznych. Gdynia : Akademia Marynarki Wojennej, 1990. Praca doktorska.
8. Praca zbiorowa. Podręcznik metrologii. [red.] P.H. Sydenham. Warszawa : Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1990. Tom I i II. ISBN 83-206-0681-0; ISBN 83-206-0812-0.
9. Riding K. The Book of Knowledge. brak miejsca : GE Power Systems University, 2001. materiały kursowe. ver.1.3.
10. Pyzdek T. The Six Sigma handbook. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc., 2003. ISBN 0-07-141596-3; DOI: 10.1036/0071415963.
11. Burdick R. K., Graybill F. A. Confidence Intervals on Variance Components. New York : Marcel Dekker, 1992. ISBN 0-8247-8644-0.
12. 12.GUM. Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologicznych. GUM 1996. Geneva : NIPM, IEC, ISO, OIMC, 1984. tłumaczenie: International vocabulary of basic and general terms In metrology

dr hab. inż. Ryszard Kłos, prof. nadzw.

AMW

Akademia Marynarki Wojennej im.

Bohaterów Westerplatte

Zakład Technologii Prac Podwodnych

81 – 103 Gdynia 3, ul. Śmidowicza 69

Tel.: +58 626 27 46, Fax.: +58 626 27 61

¹we wcześniejszym artykule pokazano praktyczny sposób zastosowania analizy R&R do oceny nowo wdrażanych analizatorów tutaj zostanie przedstawiony ogólny wstęp teoretyczny,

²gage repeatability and reproducibility,

³czyli przypadkowy; określenia tego używa do odróżnienia od określenia statystyczny, które ma także znaczenie spoza statystyki matematycznej,

⁴critical to quality,

⁵błędy systematyczne są zminimalizowane do akceptowanego poziomu poprzez wprowadzenie poprawek lub zastosowanie specjalnych metod pomiarowych,

⁶jeśli w danej sytuacji problemowej akceptowalne jest przyjęcie dokładności na ustalonym poziomie z punktu widzenia celowości podejmowanego działania,

⁷akceptowalne w danych warunkach,

⁸wartość poprawna jest estymatorem wartości prawdziwej,

⁹Jako system pomiarowy uważany jest coraz częściej taki zestaw, który w prosty sposób dostarcza łatwo interpretowalne wyniki, przy czym nie wymaga skomplikowanej obsługi przez kwalifikowanych operatorów. Dawniej, jako przyrząd pomiarowy uważano wyposażenie dedykowane specjalnym typom pomiarów. Obecnie pojęcia te, ze względu na znaczny postęp metod i elektronizację pomiarów trudno spotkać urządzenie pomiarowe, które nie stanowiłoby skomplikowanego systemu elektro– mechanicznego,

¹⁰przyrząd pomiarowy to urządzenie przeznaczone do wykonywania pomiarów samodzielnie lub w połączeniu z jednym lub z wieloma urządzeniami dodatkowymi [12],

¹¹Standard Operating Procedure – SOP,

¹²osiągnięcia metrologii są nadal koniecznym elementem wiedzy analityka systemów pomiarowych – dość często nieuwzględnianie tego prostego faktu prowadzić może do poważnych problemów,

¹³wzorzec jednostki miary (etalon) to przyrząd pomiarowy, materiał odniesienia lub układ pomiarowy przeznaczony do zdefiniowania, zrealizowania, zachowania lub odtwarzania jednostki miary albo jednej z wielu wartości pewnej wielkości i służący jako odniesienie [12],

¹⁴wzorcowanie (kalibracja) to zbiór operacji ustalonych, w określonych warunkach, relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy lub układ pomiarowy albo wartościami reprezentowanymi przez wzorzec miary lub materiał odniesienia a odpowiednimi wartościami wielkości realizowanymi przez wzorce jednostki miary [12],

¹⁵przez zdolność procesu pomiarowego należy rozumieć stopień spełnienia przez wymogów jakościowych CTQ,

¹⁶Przykładowo:

Badanie typu będące zespołem czynności mających na celu wykazanie czy przyrząd pomiarowy danego typu spełnia wymagania stanowiące podstawę do zatwierdzenia typu według ustawy o miarach.

Legalizacja będąca zespołem czynności obejmujących sprawdzenie, stwierdzenie i poświadczenie dowodem legalizacji, że przyrząd pomiarowy spełnia wymagania według ustawy o miarach.

Uwierzytelnianie będące wynikiem wzorcowania, które może być poświadczone dokumentem nazywanym niekiedy świadectwem wzorcowania lub protokołem wzorcowania,

¹⁷Uniwersalne systemy pomiarowe wymagają adjustacji i wzorcowania na warunki wykonywanych pomiarów, gdyż zależnie od doboru parametrów pracy mogą być wykorzystane do różnych pomiarów, np. chromatograf gazowy zależnie od doboru kolumny, parametrów jej pracy, rodzaju detektora i SOP może służyć do pomiarów jakościowych lub ilościowych różnych ciekłych i gazowych mieszanin,

¹⁸niekiedy należy dążyć do precyzyjnego oszacowania aktualnej wiarygodności pomiarów, np. w technice bezpieczeństwa, ochrony zdrowia, warunków pracy, metrologii prawnej itp.,

¹⁹czasami zastosowanie jej uniemożliwiają nie tyle przyczyny techniczne, lecz brak uzasadnienia ekonomicznego,

²⁰czasami trudno zastosować wzorcowanie na działającej linii produkcyjnej, gdyż może to wymagać zatrzymania procesu produkcyjnego, wyłączenia z ruchu czy przełączenia na równoległy przyrząd, który nierzadko jest elementem systemu automatyki – oczywiście prawidłowo zaprojektowane systemy pomiarowe muszą posiadać możliwość wzorcowania, lecz może być ona nieuzasadniona lub kłopotliwa w danym momencie,

²¹przykładowo na podstawie atestu uznanej firmy,

²²najlepszą, dostępną powszechnie na rynku,

²³sprawdzanie,

²⁴błędy systematyczne zostały tak skompensowane, że są minimum o rząd wielkości mniejsze od błędów przypadkowych, błędy grube są przedmiotem analizy statystycznej dla punktów odstających,

²⁵zależność odpowiedzi system pomiarowego O w funkcji wartości mierzonej, np. wzorca W : $O = f(W)$,

²⁶stabilność odpowiedzi O system pomiarowego w funkcji czasu τ : $O = f(\tau)$,

²⁷przykładowo, może istnieć możliwość zastosowania dwóch typów oprogramowania obsługującego system pomiarowy,

²⁸lecz w takim przypadku nie można oszacować wszystkich składowych błędów systematycznego metody pomiarowej,

²⁹odtwarzalność to stopień zgodności wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonanych w zmiennych warunkach pomiarowych [12],

³⁰powtarzalność to stopień zgodności wyników kolejnych pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonywanych w tych samych warunkach pomiarowych [12],

³¹istotnym jest wybór wycinka czasu do przeprowadzenia takich oszacowań, gdyż ma on znaczący wpływ na estymowane wartości odtwarzalności i powtarzalności – im krótszy tym, z reguły, lepsze wartości szacowanych parametrów,

³²zdolność pomiarową,

³³Good Laboratory Practice,

³⁴powtarzanie pomiaru,

³⁵często stosowane jest także określenie zdolności procesu pomiarowego, które dotyczy już stwierdzenia wypełnienia wymagań jakościowych CTQ dla procesu pomiarowego do konkretnych zastosowań, zaś oszacowanie wiarygodności leży u podstaw formalnego stwierdzenia tej zdolności,

³⁶reliability and reproducibility,

³⁷tradycyjnie naucza się prawidłowo, że błędy systematyczne powinny być minimalizowane do akceptowanego poziomu nad interpretując poprzez stwierdzenie o możliwości ich całkowitej eliminacji, lecz w wielu przypadkach jest to niemożliwe (1; 7),

³⁸błąd systematyczny stanowi wartość bezwzględną odchylenia zaś niepewność rozumiana jest tutaj, jako rozszerzenie tej wartości o jego granice dokładności wyznaczenia,

³⁹czasami przyjmuje się większą wartość błędów systematycznego uwzględniając także różne modyfikacje systemu pomiarowego, jak: różne wersje oprogramowania, metody adjustacji, eksploatacyjnego sprawdzenia itp., spotykane najczęściej w postaci deklaracji producenta dotyczącej maksymalnego błędów systematycznego dla przekazywanego użytkownikowi systemu pomiarowego,

⁴⁰oszacowanie stopnia spełnienia wymagań jakościowych CTQ przez system pomiarowy,

⁴¹np. procesu produkcyjnego,

⁴²naturalnej fluktuacji wielkości mierzonej,

⁴³mierzona wielkość fizyczna, właściwość, stan itp.,

⁴⁴przy wykorzystaniu wzorców wartości poprawnej,

⁴⁵nie ma pełnej zgodności z cytowanym źródłem,

⁴⁶nazywany także *PTR* – precision to tolerance ratio,

⁴⁷będących realizacją zmiennej losowej $X \leftarrow x_i$,

⁴⁸*USL*– Upper Specification Limit; *LSL*– Lower Specification Limit,

⁴⁹Ustawieniach,

⁵⁰losowy rozdział kolejności realizacji różnych kombinacji próbek i ustawień systemu pomiarowego,

⁵¹dla przyrządu przenośnego,

⁵²funkcja służąca do szacowania wartości parametru rozkładu,

⁵³najczęściej podawany w postaci średniej arytmetycznej \bar{x} ,

⁵⁴rozumianego jako wynik cyklu czynności badawczych prowadzących do oszacowania ostatecznego wyniku w postaci konkluzji z badań,

⁵⁵występowanie czynnika deterministycznego zaburzającego analizę,

⁵⁶często zdarza się taka sytuacja, gdy zakres pomiarowy danego systemu pomiarowego nie pokrywa się z wymaganym,