

Roman Urba

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Niepewność pomiaru fizykomechanicznych czynników środowiskowych w zakładach górnictwa nafty i gazu

Wprowadzenie

Szacowanie niepewności otrzymanych wyników z badań jest istotną częścią teorii pomiarów. Biegła znajomość tych zasad warunkuje zarówno uzyskiwanie poprawnie sformułowanych i wiarygodnych wyników pomiarów, jak i istotny wpływ niepewności na wiarygodność oceny jakości badanych obiektów [2].

Podając wynik pomiarów wielkości fizycznej należy koniecznie podać także pewną ilościową informację o jakości tego wyniku – tak, aby korzystający z tego wyniku mógł oszacować jego wiarygodność. Bez takiej informacji wyniki pomiarów nie mogą być porównywane ani między sobą, ani z wartościami odniesienia podawanymi w specyfikacji lub normie. Potrzebna jest więc wygodna w stosowaniu, zrozumiała i powszechnie akceptowana procedura charakteryzowania jakości wyniku pomiaru, tj. procedura obliczania i wyrażania jego niepewności. Pojęcie niepewności jako pewnej liczbowo wyrażanej cechy jest stosunkowo nowe w historii pomiarów, choć błąd i analiza błędów od dawna są częścią wiedzy o pomiarach, czyli metrologii. Wiadomo powszechnie, że gdy obliczy się wszystkie znane albo oczekiwane składowe błędy i gdy wprowadzi się je jako odpowiednie poprawki, pozostaje jeszcze niepewność co do poprawności tak otrzymanego wyniku i wątpliwości – na ile wynik pomiaru dobrze reprezentuje wartość wielkości będącej przedmiotem pomiaru [6, 10].

Tak jak powszechne stosowanie Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI) przyniosło spójność wszystkich pomiarów w nauce i technice, tak uzgodnienie – w skali

światowej – poglądów co do obliczania i wyrażania niepewności pomiarów umożliwia pełne zrozumienie i właściwą interpretację wyników ogromnej liczby pomiarów wykonywanych w nauce, technice i innych gałęziach przemysłu [10].

Koncepcja podejścia, stanowiąca podstawę wyrażania niepewności pomiaru, jest przedstawiona przez Zalecenie INC-1 (1980) [5] Grupy Roboczej ds. Określenia Niepewności, powołanej przez BIPM na prośbę CIPM. Wydanie przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) dzieła o angielskim tytule *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* było ważnym wydarzeniem dla wszystkich, którzy zajmują się pomiarami [5]. Powyższe opracowanie, z inicjatywy Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM), podaje zasady obliczania i wyrażania niepewności pomiaru uznane przez siedem najważniejszych organizacji międzynarodowych, zrzeszających tych, dla których pomiar jest doświadczeniem podstawowym (BIPM – Międzynarodowe Biuro Miar, IEC – Międzynarodowa Komisja Elektroniczna, IFCC – Międzynarodowa Federacja Chemii Klinicznej, ISO – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna, IUPAC – Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej, OIML – Międzynarodowa Organizacja Metrologii Prawnej). Podaje ono praktyczny sposób wyrażania i szacowania niedokładności pomiaru. Zasady wyrażania i obliczania niepewności zaleca się stosować we wszystkich pracach wykonywanych pod auspicjami CIPM i są one obowiązujące dla wszystkich służb miar na całym świecie.

Niepewność jako element wiarygodności badań – analiza

Niepewność pomiaru jest to różnica pomiędzy wartością pewnej wielkości uzyskanej w wyniku pomiaru, a rzeczywistą wartością tej wielkości. Cechuje ona rozrzut wartości, wewnątrz którego można z zadowalającym prawdopodobieństwem usytuować wartość wielkości mierzonej. Żaden pomiar nie jest idealnie dokładny, czyli zawsze wszystkie pomiary są obarczone jakąś niepewnością [7].

Zalecenie INC-1 (1980) Grupy Roboczej ds. Określenia Niepewności dzieli składniki niepewności na dwie kategorie, w zależności od metody ich obliczania: „A” i „B”. Oba typy obliczania są oparte na rozkładach prawdopodobieństwa, a składowe niepewności – obliczone zarówno jedną jak i drugą metodą – są określane w kategoriach wariancji lub odchyłeń standardowych [5].

Niezależnie od metody pomiarów, nie możemy nigdy bezwzględnie dokładnie wyznaczyć rzeczywistej wartości wielkości fizycznej. Różnicę pomiędzy wynikiem pomiaru a rzeczywistą wartością mierzonej wielkości nazywamy błędem pomiaru. Błędy pomiarów tradycyjnie dzielimy

na grube (omyłki), przypadkowe oraz systematyczne. Błędy grube powstają zwykle na skutek nieuwagi lub niestaranności obserwatora; błędy systematyczne wynikają z niedoskonałości przyrządów i metod pomiarowych, zaś z błędami przypadkowymi mamy do czynienia zawsze. Wynikają one zazwyczaj z nie dających się uwzględnić czynników towarzyszących w pobliżu przyrządu pomiarowego podczas pomiaru, takich jak: wahania temperatury, ruch powietrza itp.

Obecnie przy opracowywaniu wyników pomiarów należy stosować się do zaleceń Międzynarodowej Normy Oceny Niepewności Pomiaru. Norma ta, uzgodniona i przyjęta ustawowo w Polsce w 1999 r., znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i techniki [7, 11].

Międzynarodowa Norma zaleca posługiwanie się terminem „niepewność pomiarowa” – zdefiniowanym jako parametr charakteryzujący wątpliwości dotyczące wartości wyniku pomiarowego. Miarą niepewności pomiarowej jest niepewność standardowa, która może być szacowana na

Tablica 1. Najważniejsze elementy oceny niepewności pomiarowej

Wielkość	Symbol i sposób obliczania
Niepewność standardowa: Ocena typu A (pomiary bezpośrednie)	Podstawa: statystyczna analiza serii pomiarów. Dla serii n równoważnych pomiarów: $u(X) = \sqrt{S^2 X} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ gdzie: $X \approx \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Niepewność standardowa: Ocena typu B (pomiary bezpośrednie)	Podstawa: naukowy osąd eksperymentatora. $u(X) = \frac{\Delta X}{\sqrt{3}}$ (gdy znana jest niepewność maksymalna ΔX)
Niepewność standardowa całkowita: Ocena typu A oraz typu B (pomiary bezpośrednie)	$u(X) = \sqrt{S^2 \bar{x} + \frac{(\Delta x)^2}{3}}$ (gdy niepewności typu A typu B są tego samego rzędu)
Niepewność złożona (pomiary pośrednie)	Dla wielkości $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$: $u_c(Y) = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial f}{\partial X_j}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k) \right]^2} u^2(\bar{x}_j)$ (gdy wszystkie wielkości X_j są nieskorelowane)
Współczynnik rozszerzenia	$k \geq 2$
Niepewność rozszerzona	$U(x) = ku(x)$ lub $U_c(x) = ku_c(x)$
Zalecany zapis niepewności (przykład)	standardowa: $g = 9,781 \text{ m/s}^2$; $u_c(g) = 0,076 \text{ m/s}^2$ $g = 9,781 (76) \text{ m/s}^2$ $g = 9,781 (0,076) \text{ m/s}^2$ rozszerzona: $g = 9,78 \text{ m/s}^2$; $U_c(g) = 0,15 \text{ m/s}^2$ $g = (9,78 \pm 0,15) \text{ m/s}^2$ (obowiązuje zasada podawania 2 cyfr znaczących niepewności)

dwa sposoby: typu A – wykorzystującą analizę statystyczną serii pomiarów oraz typu B – opartą na naukowym osądzie obserwatora. Symbolem niepewności standardowej jest u (od angielskiego *uncertainty*). Należy jednak pamiętać, że u nie jest funkcją, tylko liczbą [4, 11].

Zestawienie najważniejszych elementów szacowania niepewności wyników badań zgodnie z międzynarodową normą zestawiono przykładowo w tabelicy 1 [7].

Międzynarodowa Norma wprowadza pojęcie niezgodności rozszerzonej – oznaczonej symbolem U (dla pomiarów bezpośrednich), lub U_c (dla pomiarów pośrednich).

Wartość niepewności rozszerzonej oblicza się ze wzoru:

$$U(x) = ku(x) \text{ lub } U_c(x) = ku_c(x)$$

Liczba k , zwana współczynnikiem rozszerzenia, jest umownie przyjętą liczbą, wybraną tak, aby w przedziale $X \pm U(x)$ znalazła się większość wyników pomiaru potrzebna dla danych zastosowań. Wartość współczynnika rozszerzenia mieści się najczęściej w przedziale 2–3. W większości zastosowań zaleca się przyjmowanie umownej wartości $k = 2$.

Wyniki pomiarów zapisujemy zawsze łącznie z nie-

Tabela 2. Szacowanie niepewności programem komputerowym (arkusz kalkulacyjny)

Pomiar natężenia hałasu	
Nazwa stanowiska pomiarowego	Stanowisko wiertacza
Typ miernika	Miernik poziomu dźwięku typu 2236C
Typ kalibratora	Kalibrator akustyczny typu 4231 klasy 1

Podstawowe dane o pomiarze	
Liczba pomiarów (n)	20
Poziom istotności (α)	0,05
Niedokładność miernika poziomu dźwięku (ΔX_1)	0,10 dB
Niedokładność kalibratora akustycznego (ΔX_2)	0,10 dB

Zestawienie wyników pomiarów			
Lp.	X_i [dB]	\bar{X} [dB]	$X_i - \bar{X}$ [dB]
1	88,20	87,36	0,84
2	87,50		0,14
3	87,60		0,24
4	88,20		0,84
5	87,40		0,04
6	87,70		0,34
7	87,60		0,24
8	87,70		0,34
9	87,50		0,14
10	87,40		0,04
11	87,60		0,24
12	87,70		0,34
13	87,00		-0,36
14	87,00		-0,36
15	86,90		-0,46
16	86,60		-0,76
17	86,30		-1,06
18	87,00		-0,36
19	86,90		-0,46
20	87,40		0,04

$$t_{n,\alpha} = 2,093$$

$$S\bar{X} = t_{n,\alpha} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = 0,227 \text{ dB}$$

$$S_c = \sqrt{S\bar{X}^2 + \frac{\sum_{r=1}^R (\Delta r X)^2}{3}} = 0,242 \text{ dB}$$

$$87,118 \leq Z \leq 87,602$$

$$U = 87,36 \pm 0,483 \text{ dB}$$

pewnością i jednostką. Niepewność podajemy zawsze z dokładnością do dwóch cyfr, zaś liczbę cyfr znaczących wyniku dobieramy tak, aby ostatnia cyfra rezultatu i niepewności należały do tego samego rzędu. Dla niepewności standardowych zaleca się zapis z użyciem nawiasów, zaś dla niepewności rozszerzonej stosowany jest zapis z użyciem symbolu \pm .

Wynik pomiaru podaje się zwykle dla poziomu ufności $p = 95\%$. Oznacza to 95-proc. prawdopodobieństwo, że wynik pomiaru zawiera się w przedziale domkniętym, ograniczonym niepewnością rozszerzoną pomiaru. Dla uzyskania danych szacowania niepewności, na wiertniach firmy Poszukiwania Nafty i Gazu Sp. z o.o. wykonano szereg pomiarów podczas wiercenia otworów za ropą i gazem ziemnym. Badania przeprowadzono specjalistyczną aparaturą: miernikiem poziomu dźwięku typu 2236C z mikrofonem skierowanym w kierunku źródła hałasu, typu SVAN 912AE z przedwzmacniaczem SVO6 i przetwornikami drgań PD-10 oraz luksomierzem L-100 – posiadającą świadectwa wzorcowania wydane przez Główny Urząd Miar w Warszawie.

Pomiary wykonano na stanowiskach obsługi urządzeń powszechnie stosowanych w wiertnictwie naftowym. Dla każdego czynnika wykonano po 20 pomiarów na

stanowiskach pracy obsługi wiertni i w środowisku, przy poziomie ufności 0,05, korzystając z wartości krytycznych $t_{n,\alpha}$ rozkładu Studenta.

Zakład Badań Środowiskowych i Atestacji w Przemśle Naftowym INiG Kraków Oddział Krosno, posiadający certyfikat wydany przez PCA na wykonywanie ww. pomiarów, opracował procedurę szacowania ich niepewności, której wartość jest obowiązująca i zgodna z rozporządzeniami oraz zaleceniami Unii Europejskiej w tym zakresie. Dla zleceńodawców podawana jest ona w sprawozdaniach z badań czynników szkodliwych na stanowiskach pracy.

Obliczenia obejmują niedokładność miernika hałasu, drgań, użytego kalibratora, niedokładność stosowanych czujników, przedwzmacniacza itp. Szacowania niepewności badań natężenia hałasu, wibracji i oświetlenia, przy poziomie ufności 95% według rozkładu t -Studenta, z uwzględnieniem niepewności przypadkowej i systematycznej, wykonywano w sposób konwencjonalny.

Tablica 2 przedstawia przykładowy tok matematycznych obliczeń programu komputerowego opracowanego w INiG do szacowania niepewności z uzyskanych danych, podczas badań biegłości porównań międzylaboratoryjnych, które Zakład wykonuje m.in. dla certyfikowanych laboratoriów w kraju.

Wnioski

1. Opracowany program komputerowy pozwala w stosunkowo krótkim czasie dokonać oceny niepewności pomiarowej.
2. Program szacowania niepewności wyników badań spełnia wymagania europejskie w tym zakresie.
3. Szacowanie wyników na poziomie ufności 95% i przy współczynniku rozszerzenia $k = 2$ potwierdza wiarygodność wykonywanych badań laboratoryjnych.

Artykuł nadesłano do Redakcji 23.02.2010 r. Przyjęto do druku 27.04.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Arendarski J.: *Niepewność pomiarów*. Wyd. WPW, wydanie II uzupełnione i poprawione, 2006.
- [2] Arendarski J.: *Niepewność pomiaru*. Wyd. Politechnika Warszawska, 2003.
- [3] Balawajder Z. Buczek J.: *Sprawozdania z badań czynników szkodliwych w zakładach nafty i gazu 2008/2009*. Dokumentacja INiG Oddział Krosno.
- [4] Fisz M.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*. PWN, Warszawa 1984.
- [5] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, first edition, 1984. International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).
- [6] Internet – informacje – Niepewność pomiaru, obliczenia, definicje itp.
- [7] Lewandowska M.: *Analiza niepewności pomiarowych*. Opracowanie 2008.
- [8] PN-ISO 3534-1:2002.
- [9] Podręcznik obliczania niepewności pomiaru w laboratoriach środowiskowych – Biuletyn Informacyjny Klubu Pollab 2/51/2008, wersja 3.
- [10] Przewodnik Głównego Urzędu Miar: *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Warszawa 1999.
- [11] Sobczyk M.: *Statystyka, Podstawy teoretyczne, przykłady, zadania*. Wyd. UMCS. ISBN 83-227-1153-0.



Dr inż. Roman URBA – pracownik Instytutu Nafty i Gazu Oddział Krosno, adiunkt, kierownik Zakładu Badań Środowiskowych i Atestacji w Przemśle Naftowym. Specjalność – badania i ocena urządzeń naftowych, środowisko wiertni.