

ANALIZA SKORELOWANIA WYNIKÓW POMIAROWYCH W OCENACH STANU ZAGROŻEŃ HAŁASOWYCH ŚRODOWISKA

5.1 WPROWADZENIE

Zalecane zasady postępowania, przy analizie niepewności pomiaru w różnych dziedzinach techniki pomiarowej zostały ujęte w *Przewodniku po niepewności* (I wydanie 1993, poprawione, 1999) [8], wydanym przez Międzynarodową Organizację Standaryzacji ISO [4]. Ten dokument, opracowany pod auspicjami siedmiu organizacji międzynarodowych przewodnik, zawiera ogólne reguły obliczania i wyrażania niepewności pomiarów, zalecane do stosowania: w Służbie Miar, akredytowanych laboratoriach, i innych placówkach do badań podstawowych i technicznych.

Jego zalecenia są również obecne w aktach prawnych i normatywnych określających reguły estymacji zagrożeń akustycznych środowiska. Zgodnie z przewodnikiem, niepewność jest traktowana jako swoista miara wpływu czynników losowych na niedokładność zbioru wyników pomiarowych, uzyskanych w tych samych warunkach pomiarowych. Składniki niepewności procesu kontrolnego są klasyfikowane do dwóch kategorii A i B, w zależności od metody ich estymacji. Niepewność typu A obliczana jest na podstawie serii wyników próby losowej, natomiast niepewność typu B określa błąd systematyczny, którego poziom jest szacowany na podstawie wiedzy eksperta, tj. osoby wykonywującej pomiar kontrolny, w sposób inny, niż przez wykonywanie pomiarów.

Przy obliczaniu niepewności typu A wyniku pomiaru kontrolnego [1, 9], podstawą procedury obliczeniowej jego estymacji jest formuła matematyczna polegająca na wyliczeniu średniej:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t \quad (5.1)$$

z wyników próby losowej x_t , $t = 1, 2, \dots, n$ w kolejnych chwilach czasu. Jest ona reprezentantem kontrolowanej zmiennej. Niepewność takiej oceny jest wyrażana poprzez odchylenie standardowe średniej dane wzorem:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_t)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5.2)$$

Takiemu postępowaniu obliczeniowemu towarzyszą założenia, wymagające aby losowość obserwacji kontrolnych podlegała prawu rozkładu normalnego, obserwacje były

nieskorelowane oraz aby nie występowały w próbie pomiarowej wyniki nietypowe (*odstające*).

Z tych podstawowych wzorów do szacowania niepewności pomiarowej typu A wynika, że jej zmniejszenie wymaga kwadratowego wzrostu liczby pomiarów kontrolnych. Realizacja takiego wymogu może prowadzić do zbyt częstego powtarzania pomiarów, do skorelowania ich obserwacji, czyli powiązania ze sobą statystycznie wyników pomiarów kontrolnych. Z sytuacją taką możemy mieć miejsce w praktyce kontroli zagrożeń akustycznych środowiska. Duży poziom zakłóceń hałasowych może bowiem w istotny sposób oddziaływać na kolejne wartości wyliczeń równoważnego poziomu dźwięku. Również próbki pomiarowe równoważnego poziomu dźwięku; niezbędne do wyliczeń kontrolowanych wskaźników hałasu; estymowane w niezbyt odległych przedziałach czasowych mogą być skorelowane przez zewnętrzne czynniki, wymuszające generację hałasu. Z przesłanek tych wynika, że dla prawidłowego stosowania obecnych formuł wyliczeń niepewności pomiarów akustycznych konieczne jest, aby odległość pomiędzy kolejnymi obserwacjami kontrolnymi stanu zagrożeń akustycznych środowiska wykluczała ich skorelowanie, tj. aby odległość przekraczała pewien promień autokorelacji przy której jej wartość jest mała. Wymóg ten sformalizował M. Drozhovetz [5], który przedstawił prosty sposób ujęcia wpływu autokorelacji poprzez zastępczą liczbę niezależnych obserwacji n_{eff} . Podobną koncepcję reprezentowała praca ZHanga [10] z *National Institute of Standards and Technology* – głównej amerykańskiej placówki metrologicznej, która nie posługiwał się jednak tym pojęciem. Pełniejszym rozwinięciem koncepcji zastępczej liczby niezależnych obserwacji n_{eff} były prace [7, 9], w których uściślono wzory na niepewność standardową oraz analizowano dokładność metod wyznaczania estymaty funkcji autokorelacji.

Niniejszy artykuł ma na celu zbadanie obecności autokorelacji w szeregach czasowych utworzonych z pomiarów wartości poziomów L_{Di} , L_{Wi} , L_{Ni} , L_{DWNi} , $i=1,2$,365 w danym roku kalendarzowym, służących do wyznaczenia średniorocznych wskaźników hałasu, których znajomość jest podstawą kształtowania polityki ochrony akustycznej środowiska zewnętrznego. Artykuł prezentuje sposób wyliczeń niepewności estymacji kontrolowanych wskaźników hałasu, w przypadku skorelowania wyników pomiarowych. Podstawą prezentacji dla analiz oceny zmienności oszacowań niepewności kontrolowanych wskaźników hałasu były wyniki z ciągłego, wieloletniego monitoringu zagrożeń akustycznych środowiska na terenie miasta Krakowa [6]. Posłużyły one do weryfikacji szerszej akceptowalności hipotezy o braku skorelowania zbioru wielkości pomiarowej w kontrolach stanu zagrożeń akustycznych środowiska, a także konieczności wprowadzenia niezbędnych modyfikacji w estymacji niepewności kontrolowanych wskaźników hałasu. Ich omówienie jest treścią prezentowanego artykułu.

5.2 BAZA WYNIKÓW BADAŃ TESTOWYCH

Podstawą weryfikacji poprawności założenia o normalności rozkładu wyników badań kontrolnych, były całoroczne, wieloletnie rejestracje poziomu dźwięku L_{Ai} ; $i=1,2,..$..., n w odstępach 1-sekundowych, zebrane na jednej ze stacji systemu ciągłego monitoringu hałasu na terenie miasta Krakowa. Opis jej funkcjonowania i adaptacji do warunków istniejącej infrastruktury sprzętowo-programowej stacji monitoringu powietrza w Krakowie, został

przedstawiony w pracy [6]. Pozwoliła on na rozpoczęcie systemowej analizy procesu zagrożenia hałasem terenów zlokalizowanych wokół jednej z głównej arterii komunikacyjnej Krakowa. Stworzyła warunki do podjęcia badań i ocen kwalifikacji stanu zagrożeń akustycznych, bazujących na akwizycji danych pomiarowych z reprezentatywnych dla ocen okresów. Dane te, posłużyły do sprawdzenia powiązań czasowych wyników poziomu w porach: dziennej L_{Di} (6:00-18:00), wieczorowej L_{Wi} (18:00-22:00) oraz w porze nocnej L_{Ni} (22:00-6:00), w kolejnych dniach roku kalendarzowego $i=1,2,.. \dots,365$, a także estymacji poziomu dzienno-wieczorowo-nocnego L_{DWNi} [4]:

$$L_{DWNt} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{0,1L_{Dt}} + 4 \cdot 10^{0,1(L_{Wt} + 5)} + 8 \cdot 10^{0,1(L_{Nt} + 10)} \right) \right] \quad (5.3)$$

Stanowiły one również bazą dla estymacji ich długookresowych-średniorocznych oszacowań $L_{LT}^{(j)}$:

$$L^{(j)} = 10 \log \left[\frac{1}{365} \sum_{k=1}^{365} L_{AeqLTk}^{(j)} \right] \quad (5.4)$$

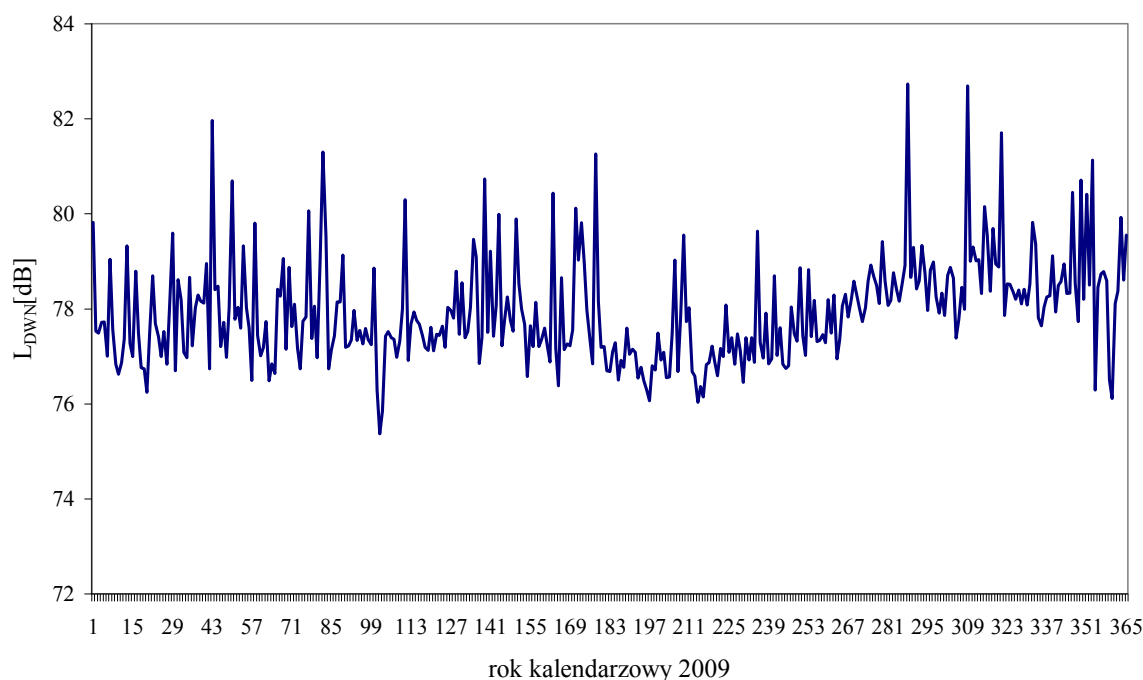
dla pory:

dnia $-j=1$,

wieczoru $-j=2$,

noce $-j=3$,

w całym roku kalendarzowym, a które są konieczne w procesie decyzyjnych związanym opracowaniem programów ochrony akustycznej środowiska.



Rys. 5.1 Przebieg zmienności wskaźnika długookresowego dla roku 2009

Z ich wartości utworzono populacje generalne wyników analizowanych wskaźników hałasu [L_{Di} , L_{Wi} , L_{Ni} , L_{DWNi}]; $i=1,2 \dots,365$, dla których analizowano poprawność założenia

o braku skorelowania wyników kontrolnych.

Przykładowy przebieg zmienności poziomu dźwięku L_{DWNi} , $i=1,2,..$...,365 dla jednego z analizowanych lat; (*określający populację generalną dla wyników losowej próby kontrolnej*); stanowiącej przedmiot analiz występowania powiązań czasowych wyników kontrolnych z kolejnych dni roku kalendarzowego zaprezentowano na rys. 5.1.

5.3 WYZNACZENIE NIEPEWNOŚCI STANDARDOWEJ ŚREDNIEJ DLA OCEN KONTROLNYCH O SKORELOWANYCH WYNIKACH OBSERWACJI POMIAROWYCH

Proces oceny zagrożeń hałasowych środowiska można zrealizować na podstawie dostępnego fragmentu szeregu czasowego, który dla ciągu ocen zmienności dziennowieczorowo-nocnego wskaźnika hałasu L_{DWNt} można zapisać w postaci:

$$L_{DWNt} = \langle L_{DWN1}, L_{DWN2}, \dots, L_{DWNn} \rangle \quad (5.5)$$

wyznaczanej dla kolejnych dni $t=1, 2, \dots, n$. roku kalendarzowego. Przykład tej realizacji ocen zmienności dla roku 2009 znajduje się na rys. 5.1.

Dla analizowanego stacjonarnego szeregu kontrolowanych zmiennych L_{DWN} oraz poziomów L_D , L_W , L_N ich podstawowe własności statystyczne są opisywane przez: średnią, wariancję. Wielkością, która odróżnia szereg czasowy od ciągu realizacji ocen akustycznych są ich powiązania dane funkcją autokorelacji. Przeprowadzone badania wykazały, że obecne w nich zmienności są ze sobą skorelowane. Badania te zostały opisane w pracach [2, 3].

W krajowych i międzynarodowych publikacjach, a także instrukcjach szacowania niepewności pomiarów akustycznych nie zajmowano się dotychczas analizą tego zjawiska. Nie uwzględnia się wpływu autokorelacji pomiędzy obserwacjami pomiarowymi na niepewność oszacowania kontrolowanych wskaźników hałasu zakładając, że obserwacje kontrolne są niezależne.

W podjętych przez autorów badaniach postanowiono zweryfikować tą własność, w odniesieniu do zmienności wskaźnika zaprezentowanego na rys. 5.1.

Obliczono współczynnik autokorelacji r_k

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.6)$$

a następnie zgodnie z zaleceniami prac [5, 7, 9] wyznaczono odchylenie standardowe średniej dla obserwacji skorelowanych zgodnie ze wzorami:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n_{eff}}} \quad (5.7)$$

$$n_{eff} = \frac{n}{1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \frac{n-k}{n} r_k} \quad (5.8)$$

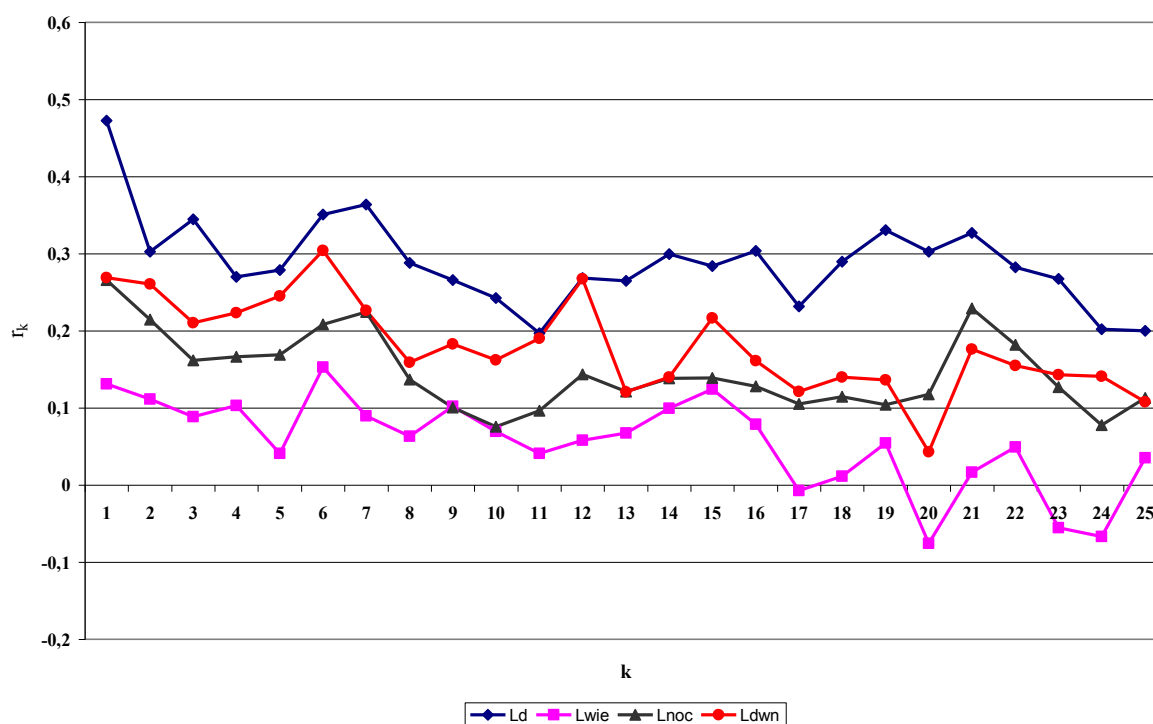
gdzie:

n_{eff} jest efektywną liczbą pomiarów mającą własność $n_{eff} < n$.

5.4 WYNIKI ANALIZ

Prezentowany w pracy przykład analizy dotyczy oszacowania niepewności dla zmienności wskaźnika dziennie-wieczorowo-nocnego L_{DWN} przedstawionego na rys. 5.1 i powiązanych z nim zmienności poziomu dźwięku L_D , L_W , L_N . Wszystkie dane wykorzystane do przeprowadzenia badań pochodziły z omówionego wcześniej ciągłego monitoringu poziomu dźwięku w Krakowie.

Wyznaczone dla nich funkcję autokorelacji L_{DWN} , L_D , L_W , L_N , zostały przedstawione na rys. 5.2.



Rys. 5.2 Funkcja autokorelacji wyznaczona dla pory dnia, wieczoru i nocy oraz wskaźnika L_{DWN} z wyników całorocznych (2009)

Z uwagi na fakt występowania autokorelacji w obserwowanych przebiegach poziomu hałasu dla analizowanych wskaźników hałasu dokonano skorygowanych obliczeń niepewności, według propozycji obliczeniowych [5, 7, 9]. Określające wynik obliczeń niepewności estymacji kontrolowanych wskaźników hałasu, według zmodyfikowanej procedury zamieszczono w tabeli 5.1

Jak wynika z przeprowadzonych badań, próba $n = 365$ skorelowanych obserwacji wskaźnika L_{DWN} jest równoważna próbce o średniej liczbie, tylko $39 \approx n_{eff} = 38.9$ nieskorelowanych obserwacji. Oznacza to, że poprawna estymacja L_{DWN} jest możliwa przy mniejszej liczbie wyników pomiarowych, równej wartości n_{eff} . Nie ma więc potrzeby wykonywania pomiarów przez cały rok ($n = 365$).

Standardowa niepewność wartości średniej wynosi 0.12 dB, jeżeli nie uwzględnia się możliwości skorelowania pomiędzy wynikami estymacji wartości poziomu hałasu wskaźnika dziennie-wieczorowo-nocnego L_{DWNi} , jakie może mieć miejsce w kolejnych dniach roku kalendarzowego. Ocena ta jest zbyt optymistyczna, około 3-krotnie mniejsza niż przy

obliczeniach nie biorących pod uwagę faktu możliwości skorelowania wyników badań kontrolnych, a w przypadku estymacji wartości poziomu hałasu wskaźnika nocnego ponad 5-krotna. Tendencja ta jest powszechna z uwagi na fakt, że całym procesie estymacji wszystkich analizowanych wskaźników hałas liczba obserwacji n_{eff} jest mniejsze od liczby pomiarów w całym roku kalendarzowym.

Tabela 5.1 Wyniki obliczeń niepewności estymacji kontrolowanych wskaźników hałasu

Wielkość	Wartość oczekiwana [dB]	Odchylenie standardowe $S(X_i)$ pojedynczego pomiaru [dB]	Niepewność U dla pomiarów nieskorelowanych [dB]	Niepewność U_s dla pomiarów skorelowanych [dB]	Różnica $\Delta U = U_s - U$ [dB]	Efektywna liczba pomiarów n_{eff}
L_{DWN}	77,93	1,11	0,12	0,36	0,24	38,9
L_D	74,52	0,92	0,10	0,38	0,28	25,2
L_W	74,28	1,92	0,20	0,38	0,18	102,1
L_N	69,79	1,31	0,14	0,80	0,66	46,7

WNIOSKI

Jak wynika z analizy hałasowych danych pomiarowych (*regularnie próbkowanych*) z jednej ze stacji ciągłego monitoringu hałasu; (*zlokalizowanej przy jednej z głównych arterii drogowych miasta Krakowa*); w ich przebiegach zauważalne jest skorelowanie ich wartości. Jest ono tym silniejsze im krótszy jest czas pobierania próbek dla estymacji równoważnego poziomu dźwięku L_{eqA} i przyjmowanych do obliczeń kontrolowanych wskaźników hałasu L_{Di} , L_{Wi} oraz L_{Ni} . Zjawisko to wynika z sposobu obliczeń równoważnego poziomu dźwięku, w którym kolejne wartości bazowe procesu kontrolnego są określone zbiorem poprzednich chwilowych wartości wykorzystanych do obliczeń równoważnego poziomu dźwięku i zaburzonym wynikiem ostatniego pomiaru poziomu dźwięku. W efekcie mamy do czynienia z pewnym ciągłym procesem stochastycznym $L_{eqA}(t)$ określonym na dyskretnym ciągu obserwacji L_A i próbkowanych w odstępach jedno sekundowych. Fakt ten oznacza, że przy ograniczonym czasie przeprowadzania pomiarów akustycznych, stosowane w praktyce sposoby zmniejszania niedokładności pomiarów kontrolnych, polegające na zwiększeniu liczebności próbek wartości L_{eqAi} , $i=1,2,\dots,n$ mogą być zawodne.

Fakt występowania skorelowania wyników pomiaru poziomu hałasu narzuca konieczność modyfikacji sposobu liczenia niepewności estymacji kontrolowanego wskaźnika hałasu. Jej opis wykonawczy jest treścią opracowanego artykułu. Wpływ skorelowania obserwacji kontrolnych, na wartość obliczeń niepewności estymacji średniej, ujmowany jest, poprzez wyznaczenie zastępczej liczby niezależnych obserwacji n_{eff} , którą zaproponował M. Dorozhovetz [5] do wyznaczenia niepewności pomiarów z uwzględnieniem autokorelacji. Nawiązuje ona do prac Bayley'a i Hammersley' (1946), którzy do opisu autoskorelowanych danych metrologicznych po raz pierwszy wprowadzili pojęcie n_{eff} . Proste zastąpienie liczby n obserwacji w obliczeniu odchylenia standardowego średniej, liczbą n_{eff} niezależnych obserwacji wskazuje, że obecne w literaturze oraz odpowiednich aktach prawnych sposoby oceny niepewności pomiarów akustycznych, dają zbyt korzystne oszacowania niepewności. Ilustracją tego faktu mogą być zamieszczone w pracy przykłady.

Jak wynika z rozważań zamieszczonych w pracy, w realizacji procesu oszacowań niepewności standardowej typu A kontrolowanych wskaźników hałasu, niezbędne jest wykonanie analiz skorelowania wyników pomiarowych. Oznacza to konieczność uzupełnienia istniejących programów komputerowych do obliczeń niepewności, algorytmami do wyznaczania funkcji autokorelacji oraz zmodyfikowanie stosownych wzorów obliczeń niepewności wartości estymowanych wskaźników hałasu, tak aby uwzględniały efektywną liczbę obserwacji.

LITERATURA

1. Arendarski I. (2003) *Niepewność pomiarów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
2. Batko W., Bal-Pyrcz R. (2006) *Uncertainty analysis in the assessment of long – term noise indicators*. Archives of Acoustics vol.31, No 4 , str 253-260.
3. Batko W., Bal-Pyrcz R., (2007) *Analysis of stochastic acoustical hazards in environment*. Archives of Acoustics vol. 32, No4 (supplement) , Warszawa, str. 235-245.
4. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.
5. Dorozhovetz M., Warsa Z. L. (2007) *Wyznaczanie niepewności typu A pomiarów o skorelowanych rezultatach obserwacji*. Pomiary Automatyka Kontrola Nr 2, s. 200-204.
6. Turzański P., Batko W. (1998). *Stan zagrożenia hałasem na terenie miasta Krakowa*. Oficyna Wydawnicza „Text” Kraków, 18-39.
7. Warsza Z. L., Zięba A. (2012): *Niepewność typu A pomiaru o obserwacjach samoskorelowanych*. Pomiary, Automatyka, Kontrola, vol. 58 nr 2 s. 157-162.
8. *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik GUM (1999) Wydawnictwo Główny Urząd Miar, Warszawa.
9. Zięba A. (2008): *Niepewność pomiaru obserwacji skorelowanych*. VII Sympozjum: 11-15 luty2008, Świnoujście, s. 72-76.
10. ZHANG N. (2006). *Calculation of the uncertainty of the mean of autocorrelated measurements*. Metrologia 43, s. 276-281.

ANALIZA SKORELOWANIA WYNIKÓW POMIAROWYCH W OCENACH STANU ZAGROŻEŃ HAŁASOWYCH ŚRODOWISKA

Streszczenie: Wyznaczenie niepewności pomiaru jest koniecznością każdej procedury kontrolnej. Zgodnie z ograniczeniami metody wyznaczenia niepewności pomiarów; (zalecanej w Przewodniku GUM opracowanym pod egidą Międzynarodowego Biura Miar (BIPM)); wystąpiła konieczność analizy powiązań czasowych chwilowych wartości poziomu dźwięku L_{Ai} , które służą do wyliczeń kontrolowanych wskaźników hałasu. Autorzy rozpatrzyli problem występowania autokorelacji w wynikach pomiaru, regularnie próbkowanych poziomów dźwięku. Przedstawiono niezbędną identyfikację funkcji autokorelacji, dla kontrolowanej zmienności w roku kalendarzowym, równoważnych poziomów dźwięku L_{Di} , L_{Wi} , L_{Ni} , $i = 1, 2, \dots, 365$. Wskazano niezbędną korektę dotychczasowych rozwiązań oceny niepewności, poprzez wyznaczenie efektywnej liczby nieskorelowanych obserwacji kontrolnych n_{eff} , zależnej od funkcji autokorelacji. Rozważania uzupełniono przykładem liczbowym ilustrującym możliwe różnice w ocenach niepewności estymacji wartości kontrolowanych wskaźników hałasu.

Słowa kluczowe: poziom dźwięku, hałas, autokorelacja, ocena niepewności

AUTOCORRELATION OCCURRENCE IN MEASUREMENT RESULTS OF REGULARLY SAMPLED SOUND LEVELS IN ENVIRONMENTAL NOISE RISK ASSESSMENT

Abstract: The determination of the uncertainty of measurement is a necessity of each control procedure. According to the limitations of the method of uncertainty of measurement determination; (recommended in the Guide of the Central Office of Measurements prepared under auspices of the International Bureau of Measurements); the necessity of analysis of time links of instantaneous sound level L_{Ai} values, which are used for calculations of the controlled noise indicators, occurred. The authors considered the problem of an autocorrelation occurrence in measurement results of the regularly sampled sound levels. The indispensable identification of the autocorrelation function for the controlled variability in the calendar year of equivalent sound levels L_{Di} , L_{Wi} , L_{Ni} , $i = 1, 2, \dots, 365$ – was presented. The necessary correction of the up to now solutions of uncertainty assessments - by determining the effective number of uncorrelated control observations n_{eff} , depended on the autocorrelation function – was indicated. These considerations were supplemented by the numerical example illustrating possible differences in uncertainty assessments in the estimation of the controlled noise indicators values.

Key words: sound level, noise, autocorrelation, uncertainty evaluation

prof. dr hab. inż. Wojciech BATKO
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: batko@agh.edu.pl

dr inż. Renata BAL
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Krośnie, Instytut Politechniczny
ul. Rynek 1, 38-400 Krosno
e-mail: renbal@pwsz.krosno.pl