

NIEPEWNOŚĆ W POMIARACH POZIOMU DŹWIĘKU

mgr Mikołaj KIRPLUK

NTL-M.Kirpluk

00-761 Warszawa, ul.Belwederska 3 m.6

www.ntlmk.com

tel.k.: 502 216620

e-mail: mkirpluk@ntlmk.com

1. WSTĘP

Niniejszy referat stanowi kontynuację poprzednich prac [7, 8] dotyczących prawidłowego sposobu określania **niepewności wyników badania hałasu** na podstawie wykonanych pomiarów poziomu dźwięku.

Przedstawiam tu podejście do obliczeń statystycznych dla wyników pomiarów poziomu dźwięku (lub poziomu ciśnienia akustycznego), faktycznie przeprowadzanych na odpowiednich do danego zastosowania wzorach, które determinują właściwe wzory na wartość oczekiwaną, będącą podstawą **obliczeń** statystycznych dotyczących wariancji zmiennych losowych jakimi są wyniki przeprowadzonych pomiarów.

Podejście **obliczeniowe** jest różne dla różnych wartości uzyskiwanych z pomiarów:

- średni poziom dźwięku (RMS LEQ),
- maksymalny poziom dźwięku (RMS MAX),
- szczytowy poziom dźwięku (Peak)

Również występują sytuacje, gdzie trudno jest zastosować prawidłowe ze statystycznego punktu widzenia podejście, jak np. przy pomiarze wskaźników poziomu dźwięku określanych dla części lub dla całej doby, kiedy możemy dokonać **szacowania** niepewności, korzystając z umownego podejścia modelowego.

Poprzednie moje artykuły, jak również wyciąg z Księgi Jakości mojego laboratorium są dostępne na mojej stronie internetowej www.ntlmk.com w zakładce „E-biblioteka”.

2. NIEPEWNOŚĆ

Niepewność możemy określać z różnym poziomem ufności, wyrażanym w procentach, oznaczającym prawdopodobieństwo uzyskania wyniku leżącego w pobliżu wartości oczekiwanej w przedziale zdefiniowanym przez tę niepewność, np.:

$$P \left\{ X \in \underbrace{\left(E(X) - U_{R,95}^-, E(X) + U_{R,95}^+ \right)}_{\text{przedział niepewności}} \right\} = 95\%$$

Gdzie $E(X)$ to wartość oczekiwana, natomiast $U_{R,95}^-$ oraz $U_{R,95}^+$ to odpowiednio dolna i górna wartość niepewności rozszerzonej, wyznaczające granice przedziału ufności 95%.

Przy czym niepewność rozszerzoną (dla 95%) na ogół otrzymujemy np. mnożąc całkowitą niepewność standardową przez współczynnik rozszerzenia $k=2$ [3], lub - w szczególnych i sprawdzonych przypadkach - bezpośrednio składając niepewności rozszerzone typu A i B.

Dla przypomnienia - rozróżniamy:

- **niepewność typu A** - U_A

możemy ją określać metodami statystyki matematycznej - **obliczać!**,

dotyczy głównie wyników pomiarów traktowanych jako zmienne losowe:

- niezależne,
- powtarzalne,
- pomiar nie wpływa na wynik.

- **niepewność typu B** - U_B

określamy ją metodami innymi niż statystyki matematycznej - **szacować!** - np:

- metryki, certyfikaty,
- dane literaturowe,
- wcześniej uzyskane dane pomiarowe,
- własne doświadczenie i wiedza,

- **szczegółowa znajomość badanych zjawisk.**

„Szacowanie niepewności typu B to bardziej sztuka doświadczalna niż rzemiosło” [2]

3. STATYSTYKA W POMIARACH AKUSTYCZNYCH

3.1. Zdarzenia statystyczne w akustyce

Aby badać zjawiska akustyczne i określać dla nich parametry statystyczne, trzeba zdefiniować zdarzenia statystyczne, dla których muszą być spełnione warunki stosowania statystyki:

- zdarzenia akustyczne powinny być *niezależne* - stąd np. należy mierzyć całe cykle lub ich wielokrotności jako zdarzenie akustyczne,
- zdarzenia akustyczne powinny być *powtarzalne* - należy uwzględniać czynniki mające wpływ na przebieg badanego zdarzenia poprzez prawidłowe określenie modelu zjawiska,
- badanie *nie powinno wpływać na przebieg* zdarzenia akustycznego.

UWAGA 1:

Nie należy mylić histogramów rozkładu statystycznego wyników pomiarów odczytywanych z mierników poziomu dźwięku ze **statystyką badanego zjawiska !**

Histogram poziomów statystycznych określa jaki jest udział w czasie obserwacji (pomiaru) poziomów dźwięku o wartościach pomiędzy zadanymi rozdzielczością statystyki (np. co 0,1 dB lub co 1 dB) - jest to statystyka *zmiierzonych poziomów* - nawet dla **jednego zdarzenia akustycznego!**

UWAGA 2:

Poziom dźwięku nie jest wielkością fizyczną - jest umowną reprezentacją wielkości fizycznej przy wykorzystaniu funkcji logarytmicznej ze wszelkimi tego konsekwencjami:

- nie jest addytywny - nie dodaje się algebraicznie - sumowanie poziomów polega na sumowaniu energii („suma logarytmiczna” poziomów),
- różnica poziomów jest krotnością - jest to różnica logarytmów! - i chociaż jest stosowana jako wskaźnik skuteczności akustycznej (np. dźwiękoizolacyjności, wyciszenia), to liczenie „wariancji” na różnicach poziomów nie ma sensu fizycznego,
- poziom dźwięku nie reprezentuje wartości „zerowej” - odpowiadającej braku emisji energii (wartość poziomu dąży do $-\infty$).

3.2. Poziom średni (energetyczna średnia arytmetyczna)

Średni poziom dźwięku (dla jednakowo prawdopodobnych zdarzeń / pomiarów) obliczamy jako tzw. „średnią logarytmiczną” określoną wzorem:

$$L_{\text{śr.}} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

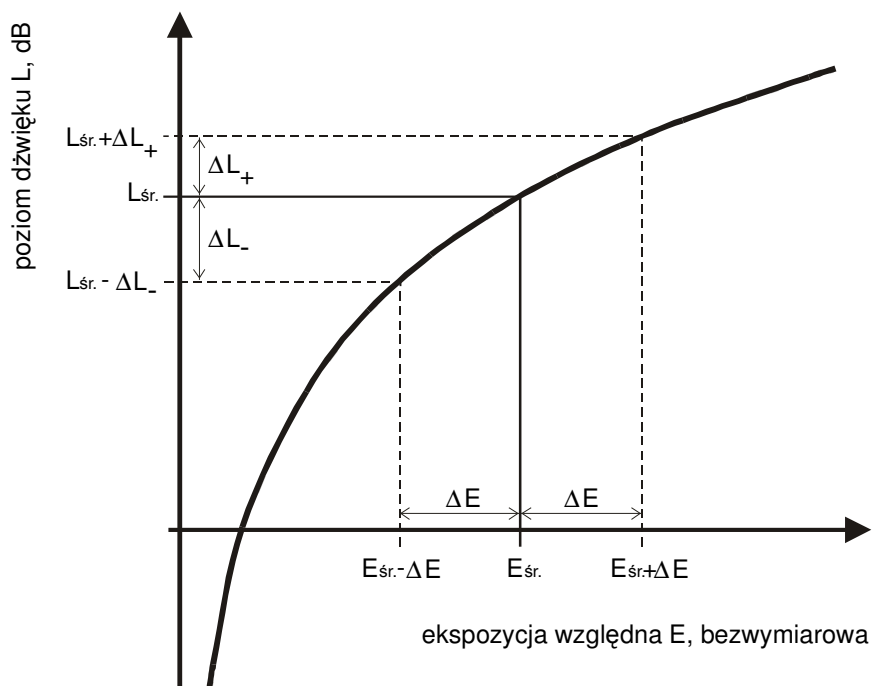
czyli wartość oczekiwaną dla **ekspozycji względnej**, rozumianą jako wielkość p^2/p_0^2 , i oznaczanej dalej symbolem E :

$$E_{\text{śr.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$$

Ekspozycja E jest proporcjonalna do energii fali akustycznej, jest addytywna i można oczekiwać, że jej rozkład będzie miał charakter rozkładu normalnego wokół wartości średniej.

Dla opisu takiej wielkości można stosować parametry statystyczne wyprowadzane ze wzorów na wartość oczekiwaną - w tym wzór na **estymatę odchylenia standardowego dla średniej** z wyników pomiarowych (wyrażonych jako ekspozycje względne!).

Przedział niepewności określamy dla ekspozycji względnych [7, 8], a potem granice przedziału przeliczamy na poziomy dźwięku i niepewności poziomów dźwięku wyrażamy względem tych granic, stosując zapis „inżynierski” polegający na odejmowaniu algebraicznym wartości poziomów dźwięku.



Rys.1. Interpretacja graficzna asymetrii granic przedziału niepewności

Konsekwencją określenia średniej wartości ekspozycji względnej $E_{sr.}$ z niepewnością symetryczną $\pm \Delta E$, czyli przedziału ufności dla ekspozycji względnej $[E_{sr.-}\Delta E, E_{sr.+} \Delta E]$, jest przedział ufności dla poziomów dźwięku $[10\log_{10}(E_{sr.-} \Delta E), 10\log_{10}(E_{sr.+}\Delta E)]$ równy przedziałowi $[L_{sr.-}\Delta L, L_{sr.+}\Delta L]$, gdzie wartość oczekiwana poziomu dźwięku $L_{sr.}=10\log_{10}(E_{sr.})$ leży niesymetrycznie wewnątrz tego przedziału (bliżej wartości górnej), stąd wartość średnia poziomu dźwięku podawana wraz z niepewnością musi mieć niesymetryczne wartości niepewności:

$$L_{sr.} (+\Delta L_+; -\Delta L_-)$$

3.3. Poziom maksymalny (RMS)

*Zgodnie z metodykami pomiarowymi **poziom maksymalny określa się jako wartość największą z uzyskanych wartości maksymalnych z kilku pomiarów elementarnych** - na ogół jest to wartość maksymalna poziomu dźwięku RMS przy stałej czasowej SLOW i korekcji częstotliwościowej A (na stanowiskach pracy i w pomieszczeniach).*

Przyjmujemy, że uzyskiwane wyniki podlegają rozrzutowi statystycznemu, dla którego jesteśmy w stanie określić **energetyczną** wartość oczekiwaną (średnią arytmetyczną w ekspozycjach względnych) według wzorów jak wyżej oraz **estymatę odchylenia standardowego w serii pomiarowej** (jest to właściwa miara, gdyż jako wynik całego badania przyjmujemy pojedynczy wynik pomiarowy, a nie średnią z wyników pomiarowych!).

Dalsze postępowanie jest następujące:

- wyznaczamy granice przedziału niepewności względem średniej z wartości maksymalnych (!) - dla serii pomiarowej próbek wyrażonych jako ekspozycje względne,
- przeliczamy tak uzyskane granice przedziałów na poziomy dźwięku,
- określamy odstęp (w decybelach) pomiędzy najwyższą zmierzoną wartością poziomu maksymalnego a obliczonymi granicami przedziału niepewności - są to niepewności (górna i dolna) wyniku pomiaru poziomu maksymalnego.

3.4. Poziom szczytowy (Peak)

Zgodnie z metodami pomiarowymi **poziom szczytowy określa się jako wartość największą z uzyskanych wartości szczytowych z kilku pomiarów elementarnych** - na ogół jest to wartość maksymalna szczytowego poziomu dźwięku (Peak) przy korekcji częstotliwościowej C (na stanowiskach pracy).

Przyjmujemy, że uzyskiwane wyniki podlegają rozrzutowi statystycznemu.

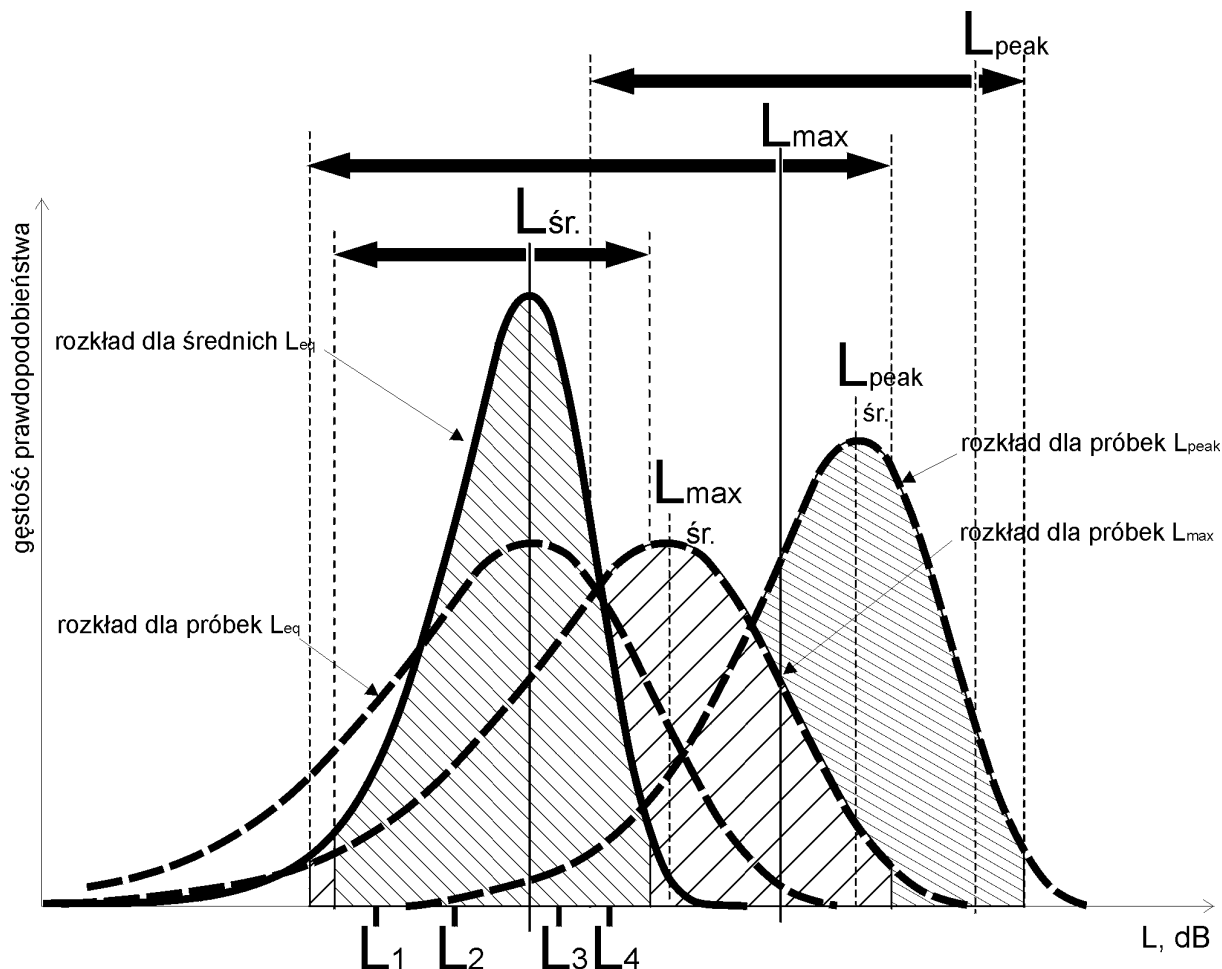
Fizyczna wielkość, którą badamy przy pomiarze poziomu szczytowego, to jest amplituda ciśnienia akustycznego p . Dla tego parametru określamy średnią - czyli **wartość oczekiwaną!** Do wykonywania obliczeń najlepsza będzie wielkość p/p , którą dalej będę nazywał **ciśnieniem względnym** i oznaczał symbolem P :

$$P = 10^{\frac{L_{peak}}{20}}$$

i dla tak określonej wielkości fizycznej (addytywnej!) wartość oczekiwaną (średnią arytmetyczną w ciśnieniach względnych) oraz **estymatę odchylenia standardowego w serii pomiarowej** (dla próbek ciśnień względnych!).

Dalsze postępowanie jest następujące:

- wyznaczamy granice przedziału niepewności względem średniej z wartości szczytowych - dla serii pomiarowej wyrażonej jako ciśnienia względne,
- przeliczamy tak uzyskane granice przedziałów na poziomy dźwięku,
- określamy odstęp (w decybelach) pomiędzy najwyższą zmierzoną wartością poziomu szczytowego a obliczonymi granicami przedziału niepewności - są to niepewności (górną i dolną) wyniku pomiaru poziomu szczytowego.



Rys.2. Interpretacja graficzna rozkładów dla różnych wskaźników poziomu hałasu (asymetria rozkładów jest związana z logarytmowaniem rozkładu normalnego)

Na powyższym rysunku oznaczono różnicę rozkładów dla średnich (linia ciągła - węższe) i dla próbek (linia przerywana - szersze).

Dla poziomów maksymalnych i szczytowych - statystykę i granice przedziałów niepewności określa poziom średni (wartość oczekiwana) z tych poziomów (liczona prawidłowo dla każdego rodzaju badania: dla poziomów maksymalnych RMS na ekspozycjach względnych, dla poziomów szczytowych Peak na ciśnieniach względnych), natomiast odstęp - wyrażane w decybelach - są określane pomiędzy granicami przedziałów a uzyskanymi wartościami największymi.

3.5. Wskaźnik dobowy - szacowanie umowne

W pomiarach **hałasu komunikacyjnego** określa się **wskaźniki dobowe** - poziom dzienny 16-godzinny oraz poziom nocny 8-godzinny.

Te same rozważania dotyczą określania innych wskaźników dobowych.

Statystycznie zdarzeniem elementarnym jest jedna doba.

Należałoby określić wskaźniki hałasu - na podstawie pomiaru ciągłego wykonanego dla co najmniej 3 kolejnych dób i dla tak uzyskanych wyników zastosować klasyczną procedurę obliczeniową (oczywiście dla ekspozycji względnych!).

Niemniej jednak, w warunkach realnych zleceń, jest to trudne do realizacji.

Proponuję zatem podejście umowne oparte na następujących założeniach:

- wykonujemy jeden ciągły pomiar całodobowy z rejestracją próbek po kilka na każdą godzinę - np. 15-minutowych (4 próbki na godzinę),
- przyjmujemy, że rozrzut wyników dla każdej godziny pomiaru jest charakterystyczny dla danego typu ruchu na badanej trasie, tzn. będzie z punktu widzenia statystycznego **powtarzalny** dla innych dni.

Procedura szacowania niepewności polega na oszacowaniu niepewności **dla każdego jednogodzinnego okresu badań** według procedury obliczeniowej dla ekspozycji względnych - **przyjmując umownie 4 pomiary elementarne po 15 minut każdy**¹.

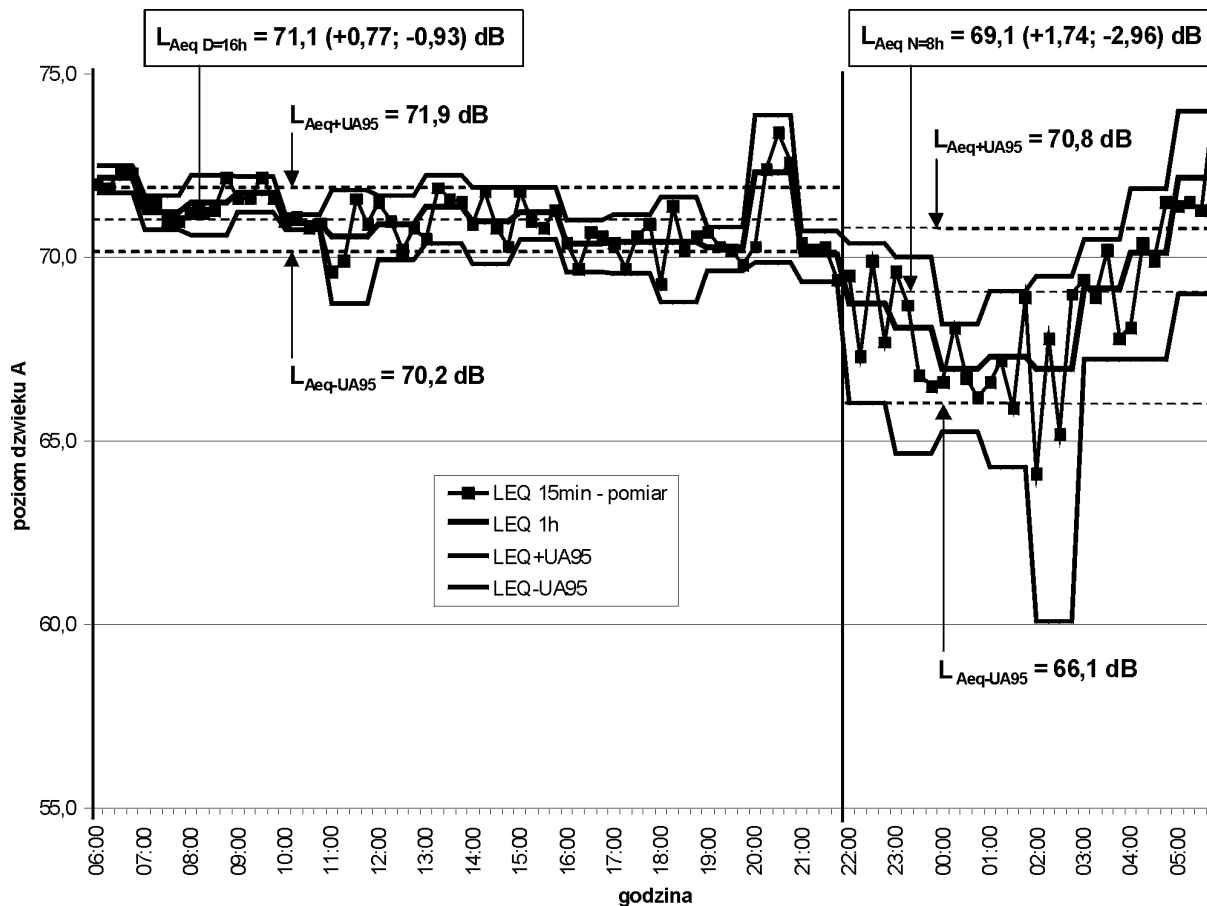
Następnie na tej podstawie określa się niepewność wskaźników dobowych (16 godzin pory dziennej, 8 godzin pory nocnej, 24 godziny wskaźnika L_{DWN}), obliczając wartości tych wskaźników odpowiednio:

- dla **górnjej granicy** przedziału niepewności - ze wszystkich godzin od poziomów jednogodzinnych **powiększonych** o niepewność pomiaru dla danej godziny,

oraz

- dla **dolnej granicy** przedziału niepewności - ze wszystkich godzin od poziomów jednogodzinnych **pomniejszonych** o niepewność pomiaru dla danej godziny.

¹ prawdopodobnie równie uprawniona będzie statystyka 10-minutowa (6 próbek) czy statystyka 20-minutowa (3 próbki) - przyjęcie przeze mnie próbek 15-minutowych wynika przede wszystkim z zasłogi sprzętowych: miernik BK 2231 miał tylko 99 komórek pamięci, co pozwalało już na pomiar całodobowy (doba to 96 próbek 15-minutowych).



Rys.3. Interpretacja graficzna określania niepewności dobowych wskaźników poziomu hałasu

Na rysunku zaznaczono wyniki pomiarów 15-minutowych i uśrednienie ich do wyników 1-godzinnych, ograniczone od góry i od dołu wykresami 1-godzinnych wyników powiększonych i pomniejszonych o niepewności dla danej godziny.

Dla każdego wskaźnika dobowego - dziennego i nocnego - określono po trzy wartości, odstępy w decybelach pomiędzy nimi wyrażają niepewności wyników².

² Na dzień pisania tego referatu nie jestem w stanie obronić tezy, że jest to dokładnie poziom ufności 95% (dla ufności 95% dla niepewności poziomów 1-godzinnych) - dalsze badania tego modelu powinny polegać na określeniu niepewności złożonej z uzyskanych niepewności 1-godzinnych przy uwzględnieniu średniej ważonej udziałem danego wyniku 1-godzinnego we wskaźniku dobowym.

4. KONKLUZJA

Obliczając niepewności dla wielkości akustycznych, dla których znamy wzory uśredniające (czyli: wzory na statystyczną wartość oczekiwaną), korzystamy ze standardowych narzędzi statystycznych - to te wzory warunkują sposób wykonywania obliczeń!

Oczywiście, muszą być spełnione wymagania statyczne dotyczące zdefiniowania zdarzeń elementarnych.

Wynika z tego różne podejście do obliczeniowego określania niepewności różnych wskaźników poziomu hałasu.

W sytuacjach, w których ze względów praktycznych, nie możemy prawidłowo zdefiniować zdarzeń akustycznych, jak w przypadku określania niepewności dla wskaźników dobowych, możemy stosować metody umowne - przy pewnych założeniach modelowania zjawiska - zapewniające w wyniku wiarygodne szacowanie niepewności.

LITERATURA:

1. I.N.Bronsztejn, K.A.Siemiendajew, „Matematyka - Poradnik encyklopedyczny”, PWN, Warszawa 1976
2. Roman Nowak, „Statystyka dla fizyków”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002, ISBN 83-01-13702-9
3. „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik.”, GUM, 1999, ISBN 83-906546-1-x
4. „Tablice matematyczne”, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 2004, ISBN 83-7350-048-0
5. Polska Norma PN-83/B-02154/02 - „*Akustyka budowlana. Pomiary izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych. Ustalenia dotyczące dokładności.*”
6. T.Gerstenkorn, T.Śródka, „Kombinatoryka i rachunek prawdopodobieństwa”, PWN, Warszawa 1972, ISBN 83-01-00204-2
7. mgr Mikołaj Kirpluk "Statystyka w pomiarach akustycznych - podstawy" - referat opublikowany w Materiałach XXXIV Zimowej Szkoły Zagrożeń Wibroakustycznych (luty 2006),
8. mgr Mikołaj Kirpluk "Szacowanie niepewności przy pomiarze i określaniu poziomu równoważnego" - referat opublikowany w Materiałach XXXV Zimowej Szkoły Zagrożeń Wibroakustycznych (luty 2007)