

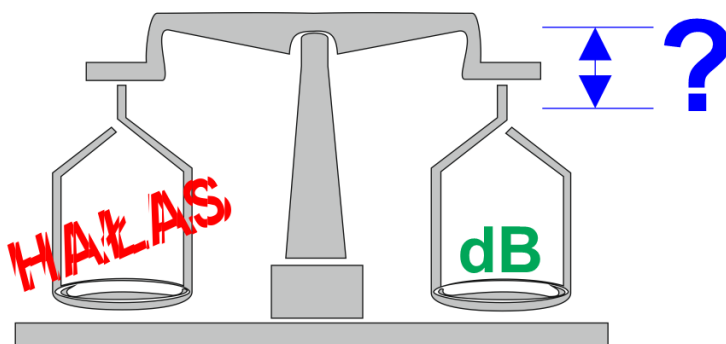
11'2025

NTL - M.Kirpluk

Mikołaj Kirpluk „NTL-M.Kirpluk”
00-761 Warszawa, ul.Belwederska 3 m.6
korespondencja / laboratorium: 43-200 Pszczyna, ul.Bratnia 33
tel. (+48) 502 216620, mkirpluk@ntlmk.com
www.ntlmk.com

Ocena niepewności pomiarów i badań akustycznych

mgr Mikołaj Kirpluk



Pszczyna, listopad 2025
(I edycja: październik 2022)



Spis treści:

1.	WSTĘP	3
1.1	Repetytorium.....	4
1.1.1	Zdarzenie losowe.....	4
1.1.2	Prawdopodobieństwo.....	4
1.1.3	Zmienne losowe.....	4
1.1.4	Dystrybuanta.....	5
1.1.5	Rozkład gęstości prawdopodobieństwa.....	5
1.1.6	Parametry rozkładu zmiennych losowych.....	5
2.	SKŁADOWE NIEPEWNOŚCI POMIARU	8
3.	METODYKA SZACOWANIA NIEPEWNOŚCI ROZSZERZONEJ - DEFINICJE	9
3.1	Definicja poziomu dźwięku.....	9
3.2	Średni poziom dźwięku.....	10
3.3	Średnia ekspozycja względna.....	10
3.4	Średnie szczytowe ciśnienie akustyczne względne.....	11
3.5	Średni szczytowy poziom ciśnienia akustycznego.....	11
3.6	Niepewność typu A.....	12
3.7	Niepewność typu B.....	12
3.8	Niepewność rozszerzona.....	12
3.9	Niepewność złożona.....	13
4.	METODYKA TYPU A WYZNACZANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU (EA-4/02:2013) ..	14
4.1	Wymagania statystyki fizycznej.....	14
4.2	Niepewność typu A pomiaru emisji.....	14
4.2.1	Seria pomiarowa o stałym czasie pomiaru elementarnego.....	15
4.2.2	Seria pomiarowa o zmiennym czasie pomiaru elementarnego.....	18
4.2.3	Pomiar ciągły do czasu ustabilizowania wyniku poziomu równoważnego.....	19
4.2.4	Pomiar hałasu komunikacyjnego.....	22
4.3	Niepewność wyniku obliczenia emisji.....	25
4.4	Niepewność wyniku obliczenia poziomu równoważnego.....	26
4.4.1	Niepewność określenia czasu.....	26
4.4.2	Niepewność określenia poziomu równoważnego.....	27
4.5	Niepewność określenia maksymalnego poziomu dźwięku.....	28
4.6	Niepewność określenia szczytowego poziomu dźwięku.....	29
4.7	Niepewność SUMY lub RÓŻNICY ARYTMETYCZNEJ poziomów dźwięku.....	31
4.8	Niepewność określenia czasu pogłosu.....	33
4.9	Niepewność określenia wyniku poziomu wzorcowego $L_{A,nT}$	33
4.9.1	Niepewność średniego poziomu dla cyklu pracy.....	33
4.9.2	Niepewność określenia poprawki k do poziomu wzorcowego $L_{A,nT}$	34
4.9.3	Niepewność maksymalnego poziomu wzorcowego $L_{AFmax,nT}$	34
4.9.4	Niepewność poziomu L_A określanego na podstawie widma oktaowego lub $1/3$ -oktaowego (tercjowego).....	34
4.10	Niepewność określenia poziomu mocy akustycznej.....	36
4.10.1	Zasada pomiaru.....	36
4.10.2	Niepewność ekspozycji dla emisji $U_{A95}(E)$	38
4.10.3	Niepewność określenia powierzchni pomiarowej $U_{A95}(S)$	38
4.10.4	Niepewność określenia chłonności akustycznej $U_{A95}(A)$ - metoda 1.....	38
4.10.5	Niepewność określenia chłonności akustycznej $U_{A95}(A)$ - metoda 2.....	39
4.11	Metoda obliczeniowa emisji hałasu do środowiska - Niepewność określenia poziomu mocy akustycznej źródeł na podstawie fizycznego pomiaru poziomu dźwięku przy źródle.....	40
4.11.1	Niepewność zmierzonego poziomu emisji hałasu.....	41
4.11.2	Niepewność związana z parametrami geometrycznymi.....	41
4.12	Metoda obliczeniowa emisji hałasu do środowiska - Niepewność określenia wyniku obliczeniowego poziomu dźwięku w punkcie obserwacji.....	42
4.12.1	Niepewność poziomu mocy akustycznej istniejących źródeł hałasu.....	42
4.12.2	Niepewność poziomu mocy akustycznej źródła typu budynek.....	42
4.12.3	Niepewność poziomu mocy akustycznej źródeł hałasu związanych z transportem.....	42
4.12.4	Niepewność poziomu mocy akustycznej projektowanych źródeł hałasu.....	42
4.12.5	Niepewność obliczonego poziomu dźwięku A emitowanego hałasu.....	43
4.13	Niepewność określenia wskaźnika izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych.....	44
4.14	Niepewność określenia wskaźnika izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych.....	47
5.	METODYKA TYPU B WYZNACZANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU (EA-4/02:2013) ...	50
5.1	Źródła niepewności typu B.....	50
5.2	Sposób obliczania - ekspozycja względna.....	51
5.3	Sposób obliczania - udziały.....	52
5.4	Sposób obliczania - sumowanie udziałów.....	53
5.5	Sposób obliczania - szczytowe ciśnienie akustyczne względne.....	54
5.6	Oszacowanie niepewności typu B.....	56
6.	ZAŁĄCZNIK 1 - BUDŻETY TYPU B LABORATORIUM NTL-M.KIRPLUK.....	58
6.1	środowisko / maszyny i urządzenia - pomiar LEQ/SEL.....	58
6.2	stanowiska pracy - pomiar LEQ/SEL, LMAX i LCpeak.....	59
7.	ZAŁĄCZNIK 2 - WSPÓŁCZYNNIKI ROZKŁADU T-STUDENTA.....	60
8.	ZAŁĄCZNIK 3 - WSPÓŁCZYNNIKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH KRZYWYCH KOREKCYJNYCH.....	61

1. Wstęp

Jest to szacowanie niepewności o asymetrycznych granicach przedziału ufności względem wartości średniej, co wynika z faktu określania wartości średniej jako średniej energetycznej.

W związku z szeregiem wymagań stawianych m.in. przez przepisy prawne zachodzi konieczność określania **niepewności wyników badania hałasu** (lub innych badań akustycznych) na podstawie wykonanych pomiarów poziomu dźwięku.

Chociaż już ogół osób zajmujących się sprawami hałasu określa **wartość średnią poziomu dźwięku jako „średnią logarytmiczną”** (szczegółowe wyjaśnienie tego pojęcia w rozdz.3.2) zgodnie z energetycznym charakterem tego zjawiska, to dalsze rachunki „statystyczne” nadal wielu wykonuje na... poziomach dźwięku! (...czyli na „decybelach”...)

Jest to „cyferkologia stosowana”...

(...i nie ma nic wspólnego ze statystyką dla zjawisk fizycznych...)

Żeby zrozumieć źródło takiego błędu trzeba uświadomić sobie genezę pojęć i wzorów statystycznych oraz stosowanych w akustyce definicji m.in. właśnie *poziomu dźwięku*.

W tym celu zamieściłem podrozdział pt. „Repetytorium”, który - mam nadzieję - przyda się wielu zainteresowanym jako swoisty „bryk” na temat rachunku prawdopodobieństwa i statystyki.

Dalej omówiłem:

- w rozdziale 4 - podejście do niepewności typu A związanej ze statystycznym rozrzutem wyników pomiarów,
- w rozdziale 5 - określenie budżetu niepewności typu B związanego ze sprzętem pomiarowym, itp.,

Złożenie obu typów niepewności jest omówione na początku skryptu w rozdziale 3.9 - pamiętaj czytelniku, że ten rachunek również należy wykonać na wartościach energetycznych (chyba, że będzie to dotyczyło wartości szczytowej - to na ciśnieniach).

Całość jest publikowana „*pro publiko bono*” do dowolnego wykorzystania - z uprzejmą prośbą o podawanie źródła - czyli:

[...] „*Ocena niepewności pomiarów i badań akustycznych*” - Mikołaj Kirpluk”

plik dostępny na stronie www.ntlmk.com w zakładce „e-biblioteka” pod adresem:

<https://www.ntlmk.com/biblioteka/M.Kirpluk%20-%20Ocena%20niepewnosci%20pomiarow%20i%20badan%20akustycznych.pdf>

Mikołaj Kirpluk

1.1 Repetytorium

1.1.1 Zdarzenie losowe

Zdarzenie, które nas interesuje będziemy nazywać zdarzeniem losowym i oznaczać dużymi literami A, B, C,

Dla zdarzeń określamy następujące pojęcia:

- zdarzenie „nie A” nazywamy zdarzeniem „przeciwnym do A” i oznaczamy „ $\sim A$ ”,
- zdarzenia „A i B” określamy jako takie zdarzenie, że zachodzi zarówno zdarzenia A jak i B, nazywamy je „koniunkcją lub iloczynem zdarzeń A i B” i oznaczamy „ $A \cap B$ ”,
- zdarzenia „A lub B” określamy jako takie zdarzenie, że zachodzi zdarzenie A lub B lub oba naraz, nazywamy je „alternatywą lub sumą zdarzeń A i B” i oznaczamy „ $A \cup B$ ”,
- jeżeli zdarzenia A i B nie mogą zachodzić jednocześnie, to nazywamy je *rozłącznymi* lub *wyłączającymi się*,
- zdarzeniem *pewnym* nazywamy zdarzenie „A lub nie A”,
- zdarzeniem *niemożliwym* nazywamy zdarzenie „A i nie A”,

1.1.2 Prawdopodobieństwo

Prawdopodobieństwo zdarzenia A oznaczamy $P(A)$ i określamy liczbą nieujemną przypisaną temu zdarzeniu, o następujących właściwościach [1]:

- jeżeli A jest zdarzeniem pewnym, to $P(A) = 1$
- jeżeli A jest zdarzeniem niemożliwym, to $P(A) = 0$
- jeżeli zdarzenia A i B są rozłączne, to:
 $P(A \text{ lub } B) = P(A) + P(B)$

stąd wynikają dalsze cechy prawdopodobieństwa:

- dla dowolnego zdarzenia A:
 $0 \leq P(A) \leq 1$
 $P(\sim A) = 1 - P(A)$
- dla dowolnych zdarzeń A i B:
 $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

1.1.3 Zmienne losowe

Dla zdarzenia losowego A określonego w następujący sposób: dla pewnych a i b, takich że $a < b$, pewna wielkość X przyjmie z określonym prawdopodobieństwem wartość z przedziału (a,b) - wielkość X nazywamy zmienna losową.

Zmienne losowe mogą być *dyskretne* (zbiór możliwych wartości składa się z elementów) lub *ciągłe* (zbiór możliwych wartości składa się z przedziałów).

Do **opisu** zmiennych losowych możemy stosować funkcje *dystrybuanty* zmiennej losowej oraz *gęstości prawdopodobieństwa* zmiennej losowej.

1.1.4 Dystrybuanta

Dystrybuanta $F(X)$ to taka niemalejąca funkcja opisująca rozkład zmiennej losowej X , która dla dowolnych a i b takich, że $a < b$, spełnia warunek:

$$F(b) - F(a) = P\{a \leq X \leq b\} = P(A)$$

1.1.5 Rozkład gęstości prawdopodobieństwa

Dla zmiennej losowej ciągłej możemy określić nieujemną funkcję $f(x)$ - gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej X - taką, że dla dowolnych a i b , gdzie $a < b$, zachodzi warunek:

$$P\{a \leq X < b\} = \int_a^b f(x)dx$$

Wynikają z tego w szczególności następujące konsekwencje:

- rozkład gęstości prawdopodobieństwa jest normalizowany do jedności:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$$

- dystrybuanta ciągłej zmiennej losowej X wyraża się wzorem:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$$

1.1.6 Parametry rozkładu zmiennych losowych

Do opisu rozkładu zmiennych losowych stosujemy różne *miary skupienia wyników* oraz *miary rozproszenia* - właściwe dla badanego / opisywanego zjawiska, np.:

rodzaj miary	parametry klasyczne		parametry pozycyjne	
Miary miejsca skupienia wyników	średnia	średnia arytmetyczna	Dominanta	(moda)
		średnia arytmetyczna ważona	Percentyle	Kwartyl górny
		średnia geometryczna		Mediana
		średnia kwadratowa		Kwartyl dolny
		średnia harmoniczna		
Miary rozproszenia	odchylenie przeciętne d		Rozstęp R	
	moment II rzędu	wariancja s^2	Percentyle	rozstęp kwartylny IQR
		odchylenie standardowe s		odchylenie kwartylny
		niepewność rozszerzona U		

Wartość oczekiwana zmiennej losowej X (ozn. $E(x)$ - *wartość przeciętna, nadzieja matematyczna*) jest definiowana jako wartość średnia - **właściwa dla badanego / opisywanego zjawiska**.

Nie oznacza to, że jest to zawsze średnia arytmetyczna.

Średnią arytmetyczną możemy stosować tylko tam gdzie jest ona **WŁAŚCIWA** do opisu badanego zjawiska.

Jeżeli dla liczb **1, 3, 5, 7, i 9** ich *średnia arytmetyczna* wynosi równo **5**, to zastosowanie innych „średnich” da zupełnie inne wyniki, np:

		liczby: 1, 3, 5, 7, 9
Średnia geometryczna	$G = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i}$	3,936...
<ul style="list-style-type: none"> dane mają rozkład logarymicznie normalny, badanie średniego tempa zmian zjawisk, które zmieniają się w postępie geometrycznym 		
Średnia kwadratowa	$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$	5,745...
<ul style="list-style-type: none"> odchylenie standardowe, gdy średnia energetyczna zależy od kwadratu zmiennej 		
Średnia harmoniczna	$H = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$	2,798...
<ul style="list-style-type: none"> dane wyrażone w jednostkach w postaci względnej [km/h, zł/kg, ...] 		

Jeżeli **wartość oczekiwana zmiennej losowej X** oznaczymy jako $E(x)$, to miarą rozproszenia może być wielkość nazywana **wariancją**, zdefiniowana jako „*wartość oczekiwana kwadratu odchylenia zmiennej X od jej wartości oczekiwanej*”, czyli:

$$D^2(X) = E\left\{[E - E(X)]^2\right\}$$

Pierwiastek kwadratowy z *wariancji* nazywamy **odchyleniem standardowym**.

Czyli - zarówno wariancja, jak i odchylenie standardowe są **zdefiniowane** wzorem na wartość oczekiwaną - właściwą do opisu danego zjawiska.

Przypadkiem szczególnym, bardzo powszechnie stosowanym, jest **średnia arytmetyczna**.

1.1.6.1 Przypadek szczególny

Średnia arytmetyczna to wartość oczekiwana zmiennej losowej dyskretnej o jednakowych prawdopodobieństwach dla skończonej liczby możliwych wartości:

$$E(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Dla średniej arytmetycznej **wariancja** wyraża się wzorem:

$$D^2(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 = (\dots) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X_i - E(X)]^2$$

i jest to wartość oczekiwana *kwadratu odchylenia zmiennej losowej od jej wartości oczekiwanej*, czyli **średnie odchylenie kwadratowe** (lub *średni błąd kwadratowy*) - takie nazewnictwo też jest prawidłowe (przyp.MK), a pierwiastek kwadratowy z tej wariancji to średnia kwadratowa odchylenia, ale też **odchylenie standardowe** lub **dyspersja**:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X_i - E(X)]^2}$$

...i ten wzór jest prawidłowy TYLKO dla wartości oczekiwanej określonej jako **średnia arytmetyczna!**

A w akustyce wzór na wartość średnią z poziomów wyrażonych w decybelach określa się wzorem (slang. „**średnia logarytmiczna**”):

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

...i nie jest to wzór średniej arytmetycznej!

Ergo:

- wzoru na odchylenie standardowe dla średniej arytmetycznej **NIE WOLNO** stosować do wartości średniej z poziomów dźwięku, bo jest to **niezgodne z zasadami statystyki**.

2. Składowe niepewności pomiaru

Na dokładność wyników pomiaru lub badania w zakresie akustyki wpływa szereg czynników, takich jak:

1. **zgodność wskazań miernika ze wzorcami** (kalibrator) - dot. spójności pomiarowej;
2. **stabilność / zmienność badanego sygnału akustycznego** - dot. odczytów wyników pomiaru - np. parametrów LEQ, SEL, L_{max} ;
3. **artefakty, niebędące przedmiotem pomiaru**, jak *pomiarowe tło akustyczne* lub *zakłócenia akustyczne* - dot. metody realizacji pomiaru i opracowania wyników;
4. **czas oddziaływania hałasu** - dot. określania poziomu równoważnego;
5. **czas zaniku sygnału** - nachylenie zarejestrowanego przebiegu - dot. czasu pogłosu;
6. **miar długości** - np. odległość, powierzchnia lub kubatura - dot. pozaakustycznych składników wzorów do obliczeń np. czasu pogłosu, poziomu mocy/energii akustycznej, izolacyjności akustycznej;
7. **przyjmowanie stabelaryzowanych poprawek** do wyniku pomiaru - dot. pomiaru w pomieszczeniach niezagospodarowanych, badaniu poziomu mocy akustycznych urządzeń w pomieszczeniach, określania poziomu wzorcowego w pomieszczeniach, uwzględniania poprawki „na odbicia” przy pomiarach przed elewacją, uwzględniania poprawki impulsowej w zależności od typu źródła hałasu lub jego poziomu;
8. **wybór punktu / punktów pomiarowych** - dot. prawidłowego określenia oddziaływania badanego hałasu, jak również określenia adekwatnego do danego badania poziomu *pomiarowego tła akustycznego*, spełnienia warunków normatywnych danej metody pomiarowej;
9. **wybór terminu i czasu prowadzenia pomiaru** - dot. określenia reprezentatywnej sytuacji dla danej metody pomiarowej;
10. **kompetencje personelu** - dot. zarówno prawidłowej obsługi sprzętu i jego nastaw pomiarowych, jak również uwzględnienia wszystkich powyższych czynników.

3. Metodyka szacowania niepewności rozszerzonej - Definicje

3.1 Definicja poziomu dźwięku

Poziom dźwięku wyrażony w decybelach to 10 logarytmów dziesiętnych ze stosunku kwadratu ciśnienia akustycznego do kwadratu ciśnienia odniesienia równego $2 \cdot 10^{-5}$ Pa:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{p^2}{p_0^2}, \text{ dB} \quad [\text{A}]$$

gdzie: p_0 - ciśnienie odniesienia $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (próg słyszenia dla 1000 Hz)

Kilka uwag formalnych:

UWAGA 1:

Często w literaturze (zwłaszcza starej...) spotyka się zapis:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0}, \text{ dB}$$

Zapis taki, choć z formalnie prawidłowy z matematycznego punktu widzenia, **traci sens fizyczny**:

- w fizycznej definicji *poziomu* wyrażanego w decybelach - wielkości logarytmowane muszą być **proporcjonalne do energii** - w akustyce taką wielkością jest **kwadrat ciśnienia akustycznego**,
- ciśnienie akustyczne (chwilowe) w pierwszej potęgze może być ujemne i wychodzi poza dziedzinę logarytmu.

Stąd próba obliczeń, np. sumy hałasu z kilku źródeł (sumowanie poziomów) lub niepewności wyników (przez różniczkowanie) prowadzi do błędów interpretacyjnych!

UWAGA 2:

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

- fizyczny wymiar „decybel” jest to „1” - LICZBA bez miana! (wielkość bezwymiarowa) - poziomy dźwięku są wyrażane w **bezwymiarowej SKALI decybelowej**, a nie w „jednostkach decybel”,
- część „decy” w nazwie „decybel” NIE JEST przedrostkiem układu SI - jest to zaszczyt historyczna w celu rozróżnienia „Bela” od dziesięciokrotnie od niego mniejszego „decyBela” i prawdą jest, że $1\text{B}=10\text{dB}$, to nie ma czegoś takiego jak „ $1\text{B} = 1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}+1\text{dB}$ ”, bo nie ma jednostki „decybel” (jest SKALA decybelowa, a każde „+1dB” to zwiększenie energii o ok.26%),
- **nie jest addytywny - nie dodaje się algebraicznie** - sumowanie poziomów polega na sumowaniu energii („suma logarytmiczna” poziomów) - stąd wstawianie poziomów L wyrażonych w decybelach do jakichkolwiek wzorów w których występuje dodawanie lub odejmowanie arytmetyczne jest **BŁĘDEM** (nie dotyczy określania „poprawek decybelowych” stosowanych w rachunkach uproszczonych),
- różnica poziomów jest krotnością - jest to różnica logarytmów! - i chociaż jest stosowana jako wskaźnik skuteczności akustycznej (np. dźwiękoizolacyjności, wyciszenia), to liczenie „wariacji” na różnicach poziomów nie ma sensu fizycznego,
- poziom dźwięku nie reprezentuje wartości „zerowej” - odpowiadającej braku emisji energii (wartość poziomu dąży do $-\infty$).

3.2 Średni poziom dźwięku

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

$$L_{sr.} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad [B]$$

Oczywiście, aby dalej badać zjawiska akustyczne i określać dla nich parametry statystyczne, trzeba zapewnić spełnienie innych **warunków stosowania statystyki**:

- zdarzenia akustyczne powinny być **niezależne** - stąd należy mierzyć całe cykle jako zdarzenie akustyczne (np. cykl = wjazd + manewry + wyjazd pojazdu),
- zdarzenia akustyczne powinny być **powtarzalne** - należy uwzględnić czynniki mające wpływ na przebieg badanego zdarzenia poprzez prawidłowe określenie modelu zjawiska - błędem jest np. badanie statystyczne hałasu komunikacyjnego w czasie narastania natężenia ruchu pomiędzy kolejnymi pomiarami lub podczas blokowania pasa ruchu spowodowanego awarią pojazdu,
- badanie **nie powinno wpływać na przebieg** zdarzenia akustycznego - np. ustawienie punktu pomiarowego zbyt blisko jezdni w polu widzenia kierowcy nadjeżdżającego pojazdu powoduje jego reakcję (na ogół zmniejszenie prędkości...).

3.3 Średnia ekspozycja względna

Przekształcając wzory [A] i [B] otrzymujemy:

$$\frac{p_{sr.}^2}{p_0^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_i^2}{p_0^2} \quad [C]$$

czyli **wartość oczekiwaną** dla wielkości p^2/p_0^2 - ekspozycji względnej (dla danego czasu pomiaru) - określoną wzorem na „średnią arytmetyczną”, dla której są określone matematyczne wzory statystyczne. Oznaczając wielkość p^2/p_0^2 jako **E** otrzymujemy:

$$E_{sr.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad [D]$$

oraz zależność poziomu dźwięku od ekspozycji względnej

$$L_p = 10 \cdot \lg E \quad [A1]$$

3.4 Średnie szczytowe ciśnienie akustyczne względne

Średnie szczytowe ciśnienie akustyczne (ew. skorygowane krzywą C korekcji częstotliwościowej) otrzymujemy ze wzoru - średnia amplitud ciśnienia akustycznego:

$$p_{\dot{s}r.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad [D2]$$

Wprowadzając pojęcie **średniego szczytowego ciśnienia akustycznego względnego** - względem ciśnienia odniesienia $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa - oznaczając je literą **P** - oraz łącząc to ze wzorem [D2] otrzymujemy wzór na **wartość oczekiwaną**:

$$P_{sr} = \frac{p_{\dot{s}r.}}{p_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{p_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad [C2]$$

oraz zależność szczytowego poziomu dźwięku od szczytowego poziomu ciśnienia akustycznego względnego

$$L_{peak} = 10 \cdot \lg P \quad [A2]$$

3.5 Średni szczytowy poziom ciśnienia akustycznego

Przekształcając wzory [A] i [C2] otrzymujemy wzór na średni poziom szczytowy (średnia amplitud):

$$L_{peaksr.} = 20 \cdot \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{peak i}}{20}} \right] \quad [B2]$$

3.6 Niepewność typu A

Niepewność wyznaczana metodą A, nazywana dalej **niepewnością typu A¹** (oznaczana jako U_A) dotyczy rozrzutu statystycznego wyników pomiaru traktowanych jako zmienne losowe o następujących cechach:

- identyczne prawdopodobieństwo zdarzenia - dla wartości oczekiwanej określonej jako średnia arytmetyczna,
- niezależne,
- powtarzalne,
- proces pomiaru nie wpływa na wynik.

Sposoby obliczania niepewności typu A przedstawiono w rozdziale 4.

3.7 Niepewność typu B

Niepewność wyznaczana metodą B, nazywana dalej **niepewnością typu B²** (oznaczana jako U_B) jest związana z niedokładnością przyrządów pomiarowych, procedur badawczych i przyjmowanych modeli zjawisk akustycznych.

Sposoby określania tej niepewności powodują, że „szacowanie niepewności typu B to bardziej sztuka doświadczalna niż rzemiosło” i określamy ją metodami innymi niż statystyki matematycznej - podstawą dla tych szacunków są:

- metryki, certyfikaty,
- dane literaturowe,
- wcześniej uzyskane dane pomiarowe,
- własne doświadczenie i wiedza,
- szczegółowa znajomość badanych zjawisk.

Sposoby obliczania niepewności typu B oraz budżet niepewności typu B przedstawiono w rozdziale 5.

Uwaga: składanie niepewności typu B tylko dla niepewności standardowych!

3.8 Niepewność rozszerzona

(niepewność o poziomie ufności 95%)

$$U_{95} = k \times u$$

gdzie:

u - niepewność standardowa

k - współczynnik rozszerzenia (dla 95%)

Uwaga: dla prób o liczności poniżej 30 należy stosować rozkład t-Sudenta.

¹ ze względów edycyjnych i wygody pozostawiono w całym tekście określenie „niepewność typu A”

² ze względów edycyjnych i wygody pozostawiono w całym tekście określenie „niepewność typu B”

3.9 Niepewność złożona

Niepewność złożona określona dla poziomu ufności 95% ($U_{R,95}$) badania hałasu jest skutkiem rozrzutu wyników pomiarów badanego hałasu wraz z tłem akustycznym (emisja) i tła akustycznego oraz niedokładności związanej z wykorzystanym sprzętem pomiarowym i zastosowana procedurą pomiarową:

$$U_{R,95} = \sqrt{U_{A,95}^2 + U_{B,95}^2}$$

gdzie:

$U_{A,95}$ - niepewność typu A związana z rozrzutem wyników pomiaru

$U_{B,95}$ - niepewność typu B związana ze sprzętem i procedurą pomiarową

UWAGA: wzór jest „uprawniony” dla niepewności rozszerzonych pod warunkiem stosowania tego samego współczynnika rozszerzenia $k=2$ dla poziomu ufności 95% (statystyczny wzór na propagację niepewności dotyczy niepewności standardowych) - **można tak przyjąć, jeśli model jest sprowadzony do rozkładów normalnych.**

- określenie niepewności **złożonej dla poziomu ufności 95%** wymaga przeprowadzenia rachunków na ekspozycjach względnych osobno dla granicy górnej i dla granicy dolnej:

$$U_{R,95}^+(E_{eq}) = \sqrt{[U_{A,95}^+(E_{eq})]^2 + [U_{B,95}^+(E)]^2} \quad [X1]$$

$$U_{R,95}^-(E_{eq}) = \sqrt{[U_{A,95}^-(E_{eq})]^2 + [U_{B,95}^-(E)]^2} \quad [X2]$$

- następnie powtarzamy procedurę według wzorów od [H] do [L] i otrzymujemy wynik wyrażony jako:

$$L \{ + U_{+R,95}; - U_{-R,95} \}$$

UWAGA 1: formalnie (fizycznie) jest to wynik niemianowany z dwiema umownymi bezwymiarowymi poprawkami, które dopiero po nieformalnym dodaniu arytmetycznym do wartości wyniku określonego jako „poziom wyrażony w decybelach” dają w efekcie dwie granice przedziału niepewności wyrażone również jako poziomy w decybelach - stąd przedatwienie poprawek w nawiasach klamrowych oznaczających zbiór liczb, a nie przedział.

Operacja arytmetycznego dodawania poprawek jest nieformalna i służy jedynie zwyczajowej prezentacji - patrz uwaga 2 poniżej.

UWAGA 2: zgodnie z formalnymi wymaganiami dokumentu EA-04/16:2003 wg pktu 7.7 w raportach wynik wraz z niepewnością należy przedstawiać w postaci:

$$L + U_{+R,95}; - U_{-R,95}, \text{ dB}$$

4. Metodyka typu A wyznaczania niepewności pomiaru (EA-4/02:2013)

Jest to szacowanie niepewności o asymetrycznych granicach przedziału ufności względem wartości średniej, co wynika z faktu określania wartości średniej jako średniej energetycznej (dla wartości RMS) albo jako średniej szczytowych amplitud ciśnień akustycznych (dla wartości PEAK).

4.1 Wymagania statystyki fizycznej

Niepewność wyznaczana metodą A, nazywana dalej **niepewnością typu A³** (oznaczana jako U_A), dotyczy rozrzutu statystycznego wyników pomiaru traktowanych jako zmienne losowe o następujących cechach:

- identyczne prawdopodobieństwo zdarzenia - dla wartości oczekiwanej określonej jako średnia arytmetyczna, (lub określone prawdopodobieństwa zdarzeń dla wartości oczekiwanej określonej jako średnia arytmetyczna ważona),
- niezależne,
- powtarzalne,
- pomiar nie wpływa na wynik.

4.2 Niepewność typu A pomiaru imisji

Pomiar imisji w punkcie pomiarowym w celu określenia poziomu dźwięku badanego hałasu razem z tłem akustycznym albo samego tła akustycznego.

Wyróżniamy szereg sytuacji pomiarowych, dla których określa się osobny tryb obliczeń:

1. seria pomiarowa o stałym czasie pomiaru elementarnego (**np.LEQ**)
- w tym też seria pomiarowa pojedynczych zdarzeń akustycznych (**np.SEL, L_{max}**),
2. seria pomiarowa o zmiennym czasie pomiaru elementarnego (trudna do opracowania statystycznego - niezalecana),
3. pomiar ciągły do czasu ustabilizowania wyniku poziomu równoważnego wg zadanych kryteriów (metoda pomiarowa obecnie nie stosowana),
4. pomiar poziomu hałasu komunikacyjnego ($np.L_{Aeq,D16h}, L_{Aeq,N8h}$)

³ ze względów edycyjnych i wygody pozostawiono w całym tekście określenie „niepewność typu A”

4.2.1 Seria pomiarowa o stałym czasie pomiaru elementarnego

Niepewność typu A określenia **poziomu imisji** lub **tła akustycznego** na podstawie **n** wykonanych pomiarów elementarnych oblicza się według następujących zasad:

- wyniki pomiarów elementarnych poziomu dźwięku wyrażone w „dB” przekształcamy do postaci ekspozycji względnej (ze wzoru [A lub A1]):

$$E_i = \frac{P_i^2}{P_0^2} = 10^{\frac{L_i}{10}}$$

- obliczamy wartość średnią (wartość oczekiwaną) - według wzoru [16.1.D]:

$$E_{\dot{s}.r.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad [E]$$

- obliczamy **estymatę średniego odchylenia standardowego S wartości średniej**⁴ zgodnie ze wzorem:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (E_{\dot{s}.r.} - E_i)^2} \quad [F]$$

- szacujemy niepewność na poziomie ufności 95%, uwzględniając **rozkład T-Studenta**, (z uwagi na małą licznosc zbioru próbek) korzystając ze wzoru:

$$U_{A,95}(E_{\dot{s}.r.}) = \tau(n) \cdot s \quad [G]$$

Uwaga: współczynnik $\tau(n)$ z tablic należy brać dla (n-1) stopni swobody i prawdopodobieństwa 0,975 !

- określamy przedział niepewności dla ufności na poziomie 95% dla ekspozycji względnej jako:

$$\langle [E_{\dot{s}.r.} - U_{A,95}(E_{\dot{s}.r.})] \leftrightarrow [E_{\dot{s}.r.} + U_{A,95}(E_{\dot{s}.r.})] \rangle \quad [H]$$

- obliczamy granice przedziału niepewności, określonego j.w., wyrażając je w wartościach poziomu dźwięku A (na podstawie wzoru [A1] - patrz rozdz.16.1.3):

$$\langle 10 \cdot \lg [E_{\dot{s}.r.} - U_{A,95}(E_{\dot{s}.r.})] \leftrightarrow 10 \cdot \lg [E_{\dot{s}.r.} + U_{A,95}(E_{\dot{s}.r.})] \rangle \quad \text{transformacja z E na L - [I]}$$

czyli:

$$\langle L_{\text{dolna_granica}} \leftrightarrow L_{\text{górna_granica}} \rangle \quad \text{transformacja z E na L - [J]}$$

⁴ formalnie: **estymator nieobciążony odchylenia standardowego w populacji** lub wg EA-4/02:2013 **odchylenie standardowe eksperymentalne średniej**

- obliczamy wartości niepewności dla wartości średniej poziomu dźwięku:
 - wartość górna $+U_{A,95}^+$ (niepewność dla wartości większych od średniej) i wartość dolna $-U_{A,95}^-$ (niepewność dla wartości mniejszych od średniej) określone jako odchylenia addytywne względem wartości średniej poziomu dźwięku dla wyżej obliczonego przedziału niepewności jako:

$$\langle [L_{\text{śr.}} - U_{A,95}^-(L_{\text{śr.}})] \leftrightarrow [L_{\text{śr.}} + U_{A,95}^+(L_{\text{śr.}})] \rangle \quad \text{transformacja z E na L - [K]}$$

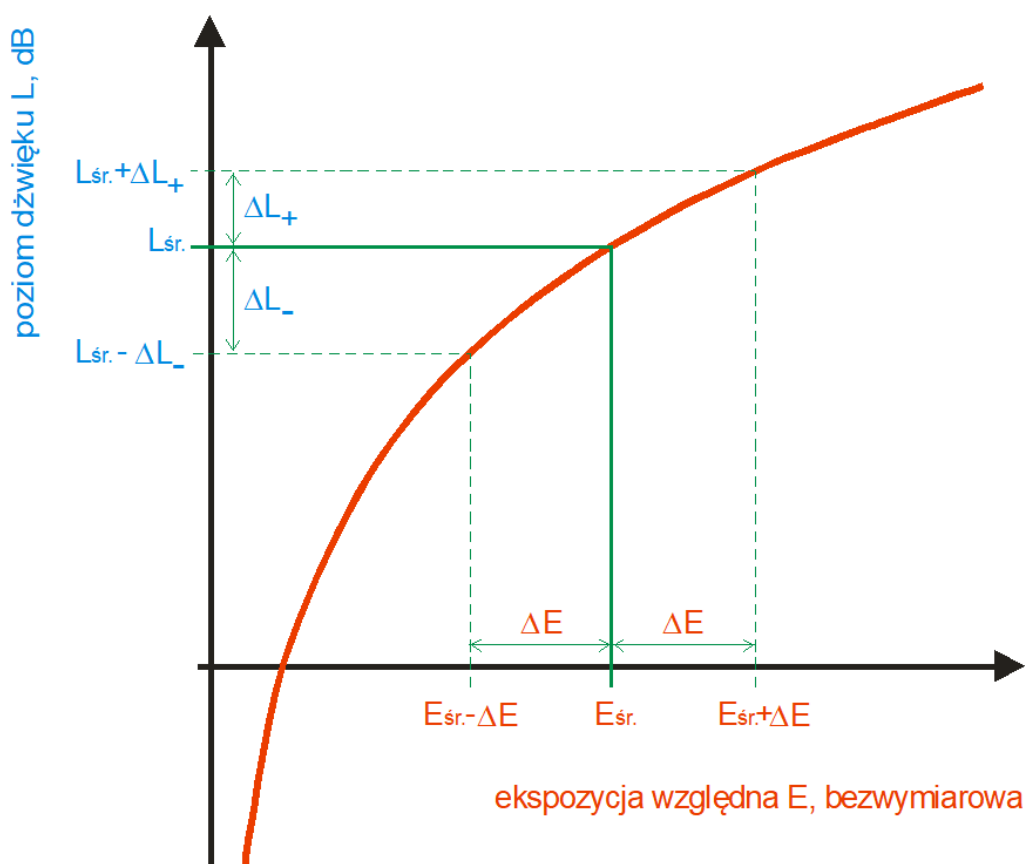
i wynik wyrażamy jako:

$$L_{\text{śr.}} \{ +U_{A,95}^+; -U_{A,95}^- \} \quad \text{transformacja z E na L - [L]}$$

UWAGA: zgodnie z formalnymi wymaganiami dokumentu EA-04/16:2003 wg pktu 7.7 w raportach wynik wraz z niepewnością należy przedstawiać w postaci:

$$L_{\text{śr.}} + U_{+A,95}^+; - U_{-A,95}^-, \text{ dB} \quad \text{[L']}$$

Interpretacja graficzna przejścia z „ekspozycji” na „poziomy”



$$[E_{\text{śr.}} - \Delta E, E_{\text{śr.}} + \Delta E] \Rightarrow [10\log_{10}(E_{\text{śr.}} - \Delta E), 10\log_{10}(E_{\text{śr.}} + \Delta E)]$$

Wartości niepewności dla poziomów - „plus” i „minus” - są dla takiego rachunku ściśle ze sobą powiązane:

{ + ΔL_+ ; - ΔL_- }

+ΔL_+	-ΔL_-
0,040	-0,040
0,050	-0,051
0,100	-0,102
0,25	-0,265
0,5	-0,565
0,812	-1,000
1	-1,301
1,364	-2,000
1,5	-2,310
1,65	-2,694
1,7575	-3,000
2	-3,818
2,50	-6,54
2,70	-8,60
3,00	-23,24
3,0101	-40
3,0102999564	-100

$$\Delta L_- = 10 \cdot \log_{10} \left(2 - 10^{\frac{\Delta L_+}{10}} \right)$$

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

praktycznie graniczna wartość sensowności obliczeń !!!

Uwaga praktyczna:

- jeśli w czasie pomiarów obserwujemy zbyt wielki rozrzut wyników (rzędu kilku decybeli), to na pewno nie wiemy co mierzymy!
Zastosowanie statystyki do takich wyników nie da nam żadnej odkrywczej informacji, poza unaocznieniem faktu, że wyciąganie średniej z takich wyników jest obarczone kolosalnym błędem.

4.2.2 Seria pomiarowa o zmiennym czasie pomiaru elementarnego

Ważona średnia arytmetyczna to wartość oczekiwana zmiennej losowej dyskretnej o różnych prawdopodobieństwach dla skończonej liczby możliwych wartości:

$$E(X) = \sum_{i=1}^n P(X_i) \cdot X_i \quad [D1]$$

Gdzie $P(X_i)$ to wagi znormalizowane do 1 (czyli są to prawdopodobieństwa).

Dla ważonej średniej arytmetycznej **wariancja** wyraża się wzorem:

$$D^2(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = \sum_{i=1}^n P(X_i) \cdot X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n P(X_i) \cdot X_i \right)^2 = \dots \textit{i_koniec_na_tym_!}$$

W ogólnym przypadku nie ma analitycznego rozwinięcia powyższego wzoru!

A zatem **wariancja** (i dalej **odchylenie standardowe** jako pierwiastek z niej) już nie mogą być liczone jako **średnie odchylenie kwadratowe**!

W takim przypadku:

- wyniki pomiarów elementarnych poziomu dźwięku wyrażone w „dB” przekształcamy do postaci ekspozycji względnej (ze wzoru [16.1.A lub A1]) i dalej według wzoru [E],
- obliczamy wartość średnią (wartość oczekiwaną) - według wzoru [D2]:

$$E_{\acute{s}r.} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T_p} E_i \quad [E]$$

gdzie T_p - suma czasów pomiarów: $T_p = \sum_{i=1}^n t_i$

- obliczamy estymatę średniego odchylenia standardowego **S** wartości średniej zgodnie ze wzorem:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T_p} \cdot X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T_p} \cdot X_i \right)^2}}{\sqrt{n}} \quad [F2]$$

- i dalej według wzorów [G]÷[L].

4.2.3 Pomiar ciągły do czasu ustabilizowania wyniku poziomu równoważnego

Dotyczy oszacowania niepewności typu A określenia poziomu równoważnego z czasu pomiaru, wykonywanego metodą pomiaru ciągłego aż do momentu ustabilizowania się wyniku poziomu równoważnego według zadanych kryteriów obserwacji.

Kryterium obserwacji:

- wahanie wyniku poziomu równoważnego z czasu pomiaru wynosi nie więcej niż 0,1 dB na 1 sekundę (dla hałasu ustalonego) lub na 1 cykl (dla hałasu okresowego)?

Sposób oszacowania:

Kryterium obserwacji:

$$|L_1 - L_2| \leq 0,1dB$$

czyli:

$$|10 \cdot \lg(E_1) - 10 \cdot \lg(E_2)| \leq 0,1dB$$

gdzie:

E_1 - średnia energia do momentu t_1

E_2 - średnia energia do momentu $t_2 = t_1 + 1s$

stąd ogólnie:

$$0,977 \leq \frac{E_1}{E_2} \leq 1,023$$

czyli zmiany energii (od początku pomiaru) są mniejsze niż 2,3% na 1 sekundę/cykl.

Zakładamy, że dla dostatecznie długiego pomiaru:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n+1} [E_i - E_2]^2}{(n+1) \cdot n}}$$

stąd:

$$(n+1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 = (n-1) \cdot \sum_{i=1}^{n+1} [E_i - E_2]^2$$

$$(n+1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 = (n-1) \cdot \left[\sum_{i=1}^n [E_i - E_2]^2 + (E_{n+1} - E_2)^2 \right]$$

skądinąd: $E_{n+1} = (n+1) \cdot E_2 - n \cdot E_1$

$$(n+1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 = (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_2]^2 + (n-1) \cdot [(n+1) \cdot E_2 - n \cdot E_1 - E_2]^2$$

$$(n+1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 = (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_2]^2 + n^2 \cdot (n-1) \cdot (E_2 - E_1)^2$$

wiemy już też, że dla naszych założeń: $E_2 = 1,023 \cdot E_1 = E_1 + 0,023 \cdot E_1$

$$\begin{aligned} (n+1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 &= \\ &= (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n \left[(E_i - E_1)^2 - 2 \cdot (E_i - E_1) \cdot 0,023 \cdot E_1 + (0,023 \cdot E_1)^2 \right] + n^2 \cdot (n-1) \cdot (0,023 \cdot E_1)^2 \end{aligned}$$

zauważamy, że: $\sum_{i=1}^n (E_i - E_1) = 0$

$$(n+1) \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 = (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (E_i - E_1)^2 + (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (0,023 \cdot E_1)^2 + n^2 \cdot (n-1) \cdot (0,023 \cdot E_1)^2$$

$$2 \cdot \sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2 = n \cdot (n-1) \cdot (0,023 \cdot E_1)^2 + n^2 \cdot (n-1) \cdot (0,023 \cdot E_1)^2$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n [E_i - E_1]^2}{n \cdot (n-1)} = \frac{(n+1) \cdot (0,023 \cdot E_1)^2}{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(n+1)}{2}} \cdot (0,023 \cdot E_1)$$

Zatem niepewność typu A o poziomie ufności 95% dla ekspozycji względnej będzie wynosić:

$$U_{A95}(E) = 2 \cdot \sigma = 0,023 \cdot \sqrt{2 \cdot (n+1)} \cdot E_1$$

stąd dla poziomów dźwięku:

$$\pm U_{A95}(L_{eq}) = 10 \cdot \lg \left[1 \pm 0,023 \cdot \sqrt{2 \cdot (n+1)} \right]$$

gdzie:

n - liczba sekund/cykli od początku pomiaru do momentu spełnienia założenia „stabilizacji”

Przy założeniu, że wynik naliczanego od początku pomiaru poziomu równoważnego z czasu pomiaru nie zmienia się bardziej niż 0,1 dB na 1 sekundę/cykl, wynika, że niepewność wyrażana dla poziomów dźwięku (asymetryczna!) zależy wyłącznie od czasu trwania pomiaru, wyrażonego w sekundach/cyklach, do momentu zaobserwowania spełnienia założeń.

Powyższy wzór ma tę właściwość, że przedział niepewności rośnie wraz z czasem - jest to fizycznie zrozumiałe: im więcej czasu musimy czekać na ustabilizowanie się wyniku, tym bardziej zmienny był badany poziom hałasu, a co za tym idzie jest większy przedział niepewności.

Podsumowanie

Wykonujemy pomiar zmiennego hałasu obserwując wynik mierzonego poziomu równoważnego z czasu pomiaru oraz czas pomiaru (lub liczbę cykli) do momentu, aż wahania wyniku będą poniżej 0,1 dB na 1 sekundę/cykl - wtedy przedział niepewności o poziomie ufności 95% zmierzonego poziomu równoważnego możemy szacować na podstawie wzorów:

$$U_{A95}(L_{eq}) = \left(+10 \cdot \lg \left[1 + 0,023 \cdot \sqrt{2 \cdot (n+1)} \right] ; -10 \cdot \lg \left[1 - 0,023 \cdot \sqrt{2 \cdot (n+1)} \right] \right)$$

przykładowo:

czas [s] lub liczba cykli	$+U_{A95}$	$-U_{A95}$
15	0,53	-0,61
30	0,72	-0,87
45	0,87	-1,08
60	0,98	-1,27
90	1,19	-1,64
120	1,34	-1,95
180	1,59	-2,54
300	1,96	-3,68

4.2.4 Pomiar hałasu komunikacyjnego

A. Procedura podstawowa

- pomiary ciągłe

dotyczy: hałas drogowy

Zdarzeniem elementarnym jest jedna doba.

Należy określić wskaźniki hałasu - na podstawie przynajmniej jednego pomiaru ciągłego wykonanego dla charakterystycznego odcinka (np. międzywęzłowego lub o podobnym zagospodarowaniu terenu) - dla co najmniej 3 kolejnych dób i zastosować procedurę 16.2.2.1. „*Seria pomiarowa o stałym czasie pomiaru elementarnego*”.

UWAGA:

Powyższa procedura jest prawidłowa ze statystycznego punktu widzenia pod warunkiem, że natężenie i struktura ruchu w kolejne dni tygodnia są porównywalne.

W ogólnym przypadku należałoby rozpatrywać każdy dzień tygodnia osobno z dodatkowym podziałem na pory roku z uwzględnieniem okresów urlopowo-wakacyjnych.

Niemniej jednak, w warunkach realnych zleceń, jest to trudne do realizacji - klient musiałby ponieść koszt kilkudniowych badań w jednym punkcie pomiarowym.

B. Procedura podstawowa

- pomiary pojedynczych zdarzeń akustycznych

dotyczy: hałas drogowy, kolejowy, lotniczy (pomiary okresowe)

Zdarzeniem elementarnym jest jeden przejazd pojazdu / jednostki / pociągu w danej klasie.

W wyniku pomiaru określa się ekspozycyjne poziomy dźwięku L_{AE} (SEL).

Dla tak uzyskanych wyników w każdej klasie należy zastosować procedurę 16.2.2.1. „*Seria pomiarowa o stałym czasie pomiaru elementarnego*”.

Następnie - obliczeniowo - określa się wskaźniki dobowe na podstawie danych o natężeniu ruchu - patrz wzory na następnej stronie (przykład dla hałasu kolejowego)!

UWAGA:

W tej procedurze zmienną obarczoną na ogół nieznanym błędem są dane lub prognozy natężenia ruchu - ten fakt należy odnotować w raporcie z badań.

Określenie równoważnego poziomu hałasu wraz z niepewnością wyniku

Poziom równoważny określono wg wzoru dla poziomów L_{AEi} określonych w odległości np. 25m:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left(\sum_i n_i \cdot 10^{0.1 \cdot L_{AEi}} \right) - 10 \cdot \lg(T[s]) - 10 \cdot \lg \left(\frac{r[m]}{25m} \right)$$

inaczej:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{25}{T[s] \cdot r[m]} \left(\sum_i n_i \cdot 10^{0.1 \cdot L_{AEi}} \right) \right]$$

gdzie :

- T - czas obserwacji: 16 godzin dla dnia (57600s) lub 8 godzin dla nocy (28800s)
 L_{AEi} - średnie poziomy ekspozycyjne SEL hałasu i-tego zdarzenia w czasie obserwacji w odl.25m
 n_i - liczba i-tego zdarzenia w czasie obserwacji
r - odległość punktu od toru lub trasy (ten człon wzoru dot. obliczeń dla innego punktu)

To samo wyrażone jako ekspozycje względne:

$$E_{Aeq} = \frac{25}{T \cdot r} \left(\sum_i n_i \cdot E_{AEi} \right)$$

Niepewność dla ekspozycji względnej jest określona wzorem:

$$U(E_{Aeq}) = E_{Aeq} \cdot \sqrt{\frac{\sum_i [(n_i \cdot U(E_{AEi}))^2 + (E_{AEi} \cdot U(n_i))^2]}{\left[\sum_i n_i \cdot E_{AEi} \right]^2} + \left(\frac{U(r)}{r} \right)^2}$$

Zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem oblicza się wyłącznie składową dodatnią $+U_{R95}(L_{Aeq})$ niepewności rozszerzonej asymetrycznej wyrażonej jako poziomy dźwięku:

$$+U(L_{Aeq}) = 10 \cdot \lg \left[10^{0.1 \cdot L_{Aeq}} + U(E_{Aeq}) \right] - L_{Aeq}$$

czyli:

$$+U(L_{Aeq}) = 10 \cdot \lg \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sum_i [(n_i \cdot U(E_{AEi}))^2 + (E_{AEi} \cdot U(n_i))^2]}{\left[\sum_i n_i \cdot E_{AEi} \right]^2} + \left(\frac{U(r)}{r} \right)^2} \right\}$$

W niepewnościach określenia poziomu równoważnego dla punktów pomiarowych uwzględnia się:

- niepewności określenia ekspozycyjnych poziomów dźwięku poszczególnych kategorii zdarzeń,
- niepewność określenia odległości wynikającą z ruchu pociągów po różnych torach: $\pm 2,5$ m
- niepewność określenia liczby zdarzeń: ± 1

C. Procedura umowna

- określanie niepewności dla pomiarów hałasu drogowego na podstawie bezpośrednich pomiarów hałasu z wykorzystaniem próbkowania (pomiary krótkotrwałe z tego samego dnia).

UWAGA1:

Procedura niniejsza wynika z adaptacji wymagań metodyki pt. „Referencyjna metodyka wykonywania okresowych pomiarów poziomów hałasu wprowadzanego do środowiska w związku z eksploatacją dróg, linii kolejowych i linii tramwajowych oraz kryteria lokalizacji punktów pomiarowych” - Załącznik nr 3 do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem (Dz. U. Nr 140 z dnia 7 lipca 2011 r., poz.824), która w punkcie E.2 dopuszcza podzielenie przedziału czasu na krótsze odcinki w celu uzyskania informacji o zmienności charakterystyki źródła hałasu.

Procedura szacowania niepewności polega na oszacowaniu niepewności **dla każdego jednogodzinnego okresu badań** według procedury 16.2.2.1. „Seria pomiarowa o stałym czasie pomiaru elementarnego” - **przyjmując umownie 4 pomiary elementarne po 15 minut każdy**.

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

C.1. Pierwszy sposób - po obwiedni (poziom ufności $\geq 95\%$):

- oblicza się wartości wskaźników dobowych odpowiednio dla **górnjej granicy** przedziału niepewności - ze wszystkich godzin od poziomów jednogodzinnych **powiększonych** o niepewność 15-minutową dla danej godziny - oraz dla **dolnej granicy** przedziału niepewności - ze wszystkich godzin od poziomów jednogodzinnych **pomniejszonych** o niepewność 15-minutową dla danej godziny - i dalej wg wzorów **[H]÷[L]** procedury 16.2.2.1. w celu określenia dodatniej i ujemnej wartości niepewności wyrażonej dla poziomu dźwięku.

C.2. Drugi sposób - składanie niepewności cząstkowych (dokładniejszy!):

- oblicza się - w przestrzeni ekspozycji względnych - niepewność wynikową jako złożenie niepewności cząstkowych 1-godzinnych pomiarów cząstkowych (odpowiednio 16 dla pory dziennej oraz 8 dla pory nocnej) wg wzorów:

$$U_{A95}(E_{eqD}) = \frac{1}{16} \sqrt{\sum_{i=1}^{16} [U(E_{Di})]^2} \quad \text{oraz} \quad U_{A95}(E_{eqN}) = \frac{1}{8} \sqrt{\sum_{i=1}^8 [U(E_{Ni})]^2}$$

i dalej wg wzorów **[H]÷[L]**.

UWAGA2:

Faktycznie, zgodnie z nomenklaturą statystyczną jest to niepewność typu B - związana z przyjętym **modelem** hałasu do obliczenia hałasu dobowego.

Jednak ze względów edycyjnych umieszczono tą procedurę w tym rozdziale.

Oszacowane niepewności sumują się z niepewnością typu B związaną z aparaturą pomiarową zgodnie prawem propagacji niepewności.

4.3 Niepewność wyniku obliczenia emisji

Niepewność typu A określenia **poziomu emisji** na podstawie obliczonych wartości średnich *poziomu imisji* oraz *tła akustycznego* oblicza się według następujących zasad:

- obliczamy wartość emisji wyrażonej jako ekspozycja względna:

$$E_{em} = E_{im} - E_{tlo_akustyczne} \quad [M]$$

UWAGA: wyrażając to samo jako poziom dźwięku, otrzymujemy znany wzór:

$$\begin{aligned} L_{em} &= 10 \cdot \lg(E_{em}) = 10 \cdot \lg(E_{im} - E_{tlo_akustyczne}) = \\ &= 10 \cdot \lg(10^{0,1 \cdot L_{im}} - 10^{0,1 \cdot L_{tlo_akustyczne}}) \end{aligned}$$

- określamy błąd wyniku emisji dla ekspozycji względnej:

$$U_{A,95}(E_{em}) = \sqrt{[U_{A,95}(E_{im.})]^2 + [U_{A,95}(E_{tlo_akustyczne})]^2} \quad [N]$$

- następnie powtarzamy procedurę według wzorów **od [H] do [L]**.

UWAGA:

W przypadku różnicy pomiędzy poziomem imisji a poziomem tła akustycznego powyżej 10 dB zgodnie z metodyką pomiarową [8] można pominąć wpływ tła akustycznego.

Jednak wtedy należy w niepewności typu B uwzględnić błąd związany z takim uproszczeniem (zawyżenie wyniku emisji), który wynosi 0,5 dB dla ww różnicy 10 dB, a 0,1 dB dla różnicy 15 dB.

4.4 Niepewność wyniku obliczenia poziomu równoważnego

4.4.1 Niepewność określenia czasu

Niepewność określenia czasu trwania sytuacji akustycznej dla której wykonano pomiary elementarne, należy określać według następujących zasad:

- zdarzenie trwające przez cały normatywny czas obserwacji **T** - niepewność związana z określeniem czasu działania źródła hałasu jest równa „0”,
- zdarzenia o ściśle określonym czasie trwania w normatywnym czasie obserwacji - niepewność równa „0”,
- zdarzenia o zmiennym czasie trwania w normatywnym czasie obserwacji - niepewność określana zgodnie z wytycznymi zawartymi w [5] dla modelu „prostokąta”, gdzie dolną i górną granicę przedziału zdarzeń stanowi odpowiednio minimalny i maksymalny czas trwania sytuacji, a **średni czas trwania jest przyjmowany jako średnia arytmetyczna z tych granic. Niepewność standardową określa się jako 58%** (dzielenie przez pierwiastek z 3) **rozstępu połówkowego pomiędzy minimalnym i maksymalnym czasem trwania sytuacji.** Niepewność na poziomie ufności 95% otrzymuje się przy zastosowaniu współczynnika rozszerzenia **k=2**.
- w przypadku sytuacji akustycznych, których czasy trwania podlegają innym rozkładom - należy zastosować indywidualne podejście.

4.4.2 Niepewność określenia poziomu równoważnego

Niepewność typu A określenia poziomu równoważnego oblicza się na podstawie znanych udziałów emisji E_{em_k} dla każdej sytuacji akustycznej i czasów trwania tych sytuacji wraz z odpowiednimi niepewnościami $U_{A,95}(E_{em_k})$ oraz $U_{A,95}(t_k)$.

- ekspozycję względną równoważną dla m sytuacji akustycznych w normatywnym czasie obserwacji T określa się według wzoru dla ekspozycji względnych:

$$E_{eq} = \sum_{k=1}^m \frac{t_k}{T} \cdot E_{em_k} = \sum_{k=1}^m E_{eq_k} \quad [O]$$

UWAGA:

wyrażając to samo jako poziomy dźwięku, otrzymujemy znany wzór na poziom równoważny:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg(E_{eq}) = 10 \cdot \lg\left(\sum_{k=1}^m \frac{t_k}{T} \cdot E_{em_k}\right) = 10 \cdot \lg\left(\sum_{k=1}^m \frac{t_k}{T} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{em_k}}\right)$$

- określa się niepewność ekspozycji względnej równoważnej dla każdej sytuacji akustycznej:

$$U_{A,95}(E_{eq_k}) = \sqrt{\left[\frac{t_k}{T} U_{A,95}(E_{em_k})\right]^2 + \left[10^{0,1 \cdot L_{em_k}} \cdot \frac{U_{A,95}(t_k)}{T}\right]^2} \quad [P]$$

- określa się niepewność wynikową ekspozycji względnej równoważnej dla sumy sytuacji akustycznych:

$$U_{A,95}(E_{eq}) = \sqrt{\sum_{k=1}^m [U_{A,95}(E_{eq_k})]^2} \quad [Q]$$

- następnie powtarzamy procedurę według wzorów od [H] do [L].

4.5 Niepewność określenia maksymalnego poziomu dźwięku

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 lub FAST 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 [B] lub [D] (patrz rozdział 16.1. KJ) oraz **estymatę odchylenia standardowego w serii pomiarowej**⁵ (jest to właściwa miara, gdyż jako wynik całego badania przyjmujemy pojedynczy wynik pomiarowy, a nie średnią z wyników pomiarowych!), określoną wzorem:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (E_{sr.} - E_i)^2} \quad [F2]$$

Dalsze postępowanie prowadzimy wg wzorów [G] ÷ [J] - uwzględniając wpływ liczby pomiarów elementarnych, składając z niepewnością typu B (wynikającą z budżetu niepewności typu B) i określając granice przedziału niepewności:

$$\langle L_{dolna_granica} \leftrightarrow L_{gorna_granica} \rangle \quad [J]$$

W celu obliczenia odchyłeń od uzyskanej wartości L_{max} (większej od średniej energetycznej!), tj. niepewności złożonej rozszerzonej dla poziomu ufności 95%, przedstawiamy przedział określony wzorem [J] w poniższej postaci:

$$\langle [L_{max} + U_{R,95}^-(L_{max})] \leftrightarrow [L_{max} + U_{R,95}^+(L_{max})] \rangle \quad [K2]$$

W ten sposób określamy wartości odchyłeń $U_{A,95}^-(L_{max})$ oraz $U_{A,95}^+(L_{max})$ jako:

$$U_{A,95}^-(L_{max}) = L_{dolna_granica} - L_{max} \quad (\text{wartość ujemna!}) \quad [L2-1]$$

$$U_{A,95}^+(L_{max}) = L_{gorna_granica} - L_{max} \quad [L2-2]$$

⁵ formalnie: **estymator nieobciążony odchylenia standardowego w próbie** lub wg EA-4/02:2013 **odchylenie standardowe eksperymentalne**

4.6 Niepewność określenia szczytowego poziomu dźwięku

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

Przyjmujemy, że uzyskiwane wyniki **amplitud ciśnienia akustycznego** (wartość szczytowa) podlegają rozrzutowi statystycznemu, dla którego jesteśmy w stanie określić wartość oczekiwaną (średnią arytmetyczną szczytowych ciśnień akustycznych względnych) według wzorów [B2] lub [D2] (patrz rozdział 16.1.4 i 16.1.5 KJ) oraz **estymatę odchylenia standardowego w serii pomiarowej**⁶ (jest to właściwa miara, gdyż jako wynik całego badania przyjmujemy pojedynczy wynik pomiarowy, a nie średnią z wyników pomiarowych!), określoną wzorem:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (P_{\acute{s}r.} - P_i)^2} \quad [F3]$$

Dalsze postępowanie prowadzimy wg wzorów [G2] ÷ [J2] (**dla wartości P!**)- uwzględniając wpływ liczby pomiarów elementarnych, składając z niepewnością typu B (wynikającą z budżetu niepewności typu B) i określając granice przedziału niepewności:

- szacujemy niepewność na poziomie ufności 95%, uwzględniając rozkład T Studenta, korzystając ze wzoru:

$$U_{A,95}(P_{\acute{s}r.}) = \tau(n) \cdot s \quad [G3]$$

- składamy tak uzyskany przedział z niepewnością typu B wyrażoną w przestrzeni **amplitud ciśnienia akustycznego względnego P**:

$$U_{R,95}(P) = \sqrt{U_{A,95}^2(P) + U_{B,95}^2(P)}$$

- określamy przedział niepewności dla ufności na poziomie 95% dla ekspozycji względnej jako:

$$\left\langle [P_{\acute{s}r.} - U_{R,95}(P_{\acute{s}r.})] \leftrightarrow [P_{\acute{s}r.} + U_{R,95}(P_{\acute{s}r.})] \right\rangle \quad [H3]$$

- obliczamy granice przedziału niepewności, określonego j.w., wyrażając je w wartościach poziomu dźwięku A (na podstawie wzoru [A2] - patrz rozdz.16.1.4):

$$\left\langle 20 \cdot \lg [P_{\acute{s}r.} - U_{A,95}(P_{\acute{s}r.})] \leftrightarrow 20 \cdot \lg [P_{\acute{s}r.} + U_{A,95}(P_{\acute{s}r.})] \right\rangle \quad \text{transformacja z P na L - [I 3]}$$

czyli:

$$\left\langle L_{\text{dolna_granica}} \leftrightarrow L_{\text{górnna_granica}} \right\rangle \quad [J3]$$

⁶ formalnie: **estymator nieobciążony odchylenia standardowego w próbie** lub wg EA-4/02:2013 **odchylenie standardowe eksperymentalne**

W celu obliczenia odchyłeń od uzyskanej wartości L_{peak} , tj. niepewności niepewności złożonej rozszerzonej dla poziomu ufności 95%, przedstawiamy przedział określony wzorem [J2] w poniższej postaci:

$$\langle [L_{peak} + U_{R,95}^-(L_{peak})] \leftrightarrow [L_{peak} + U_{R,95}^+(L_{peak})] \rangle \quad [K3]$$

W ten sposób określamy wartości odchyłeń $U_{A,95}^-(L_{max})$ oraz $U_{A,95}^+(L_{max})$ jako:

$$U_{A,95}^-(L_{peak}) = L_{dolna_granica} - L_{peak} \quad (\text{wartość ujemna!}) \quad [L3-1]$$

$$U_{A,95}^+(L_{peak}) = L_{gorna_granica} - L_{peak} \quad [L3-2]$$

4.7 Niepewność SUMY lub RÓŻNICY ARYTMETYCZNEJ poziomów dźwięku

1. Obliczanie **arytmetycznej SUMY** poziomów dźwięku wyrażonych w *decybelach* ma zastosowanie do „inżynierskiego” określania:

- wartości poziomu dźwięku z różnymi poprawkami - przede wszystkim poprawkami stabelaryzowanymi (np. „kara” za impulsowość, poprawki na chłonność akustyczną niezagospodarowanego pomieszczenia, itp.)

Suma arytmetyczna poziomu dźwięku i poprawki fizycznie jest interpretowana jako zastosowanie „mnożnika” dla wielkości energetycznej.

2. Obliczanie **arytmetycznej RÓŻNICY** poziomów dźwięku wyrażonych w *decybelach* ma zastosowanie do „inżynierskiego” określania:

- odchyień od zadanej wartości (np. poziomu dopuszczalnego, wartości średniej, itp.)
- skuteczności akustycznej (np. izolacyjności, ekranowania, itp.)

Różnica arytmetyczna poziomów dźwięku fizycznie jest interpretowana jako „krotność” energetyczna pomiędzy dwoma wielkościami energetycznymi.

Jeśli:

$$L = L_2 \pm L_1 \quad \text{oraz} \quad k = 10^{\frac{L}{10}}$$

to możemy to zapisać jako:

$$10 \cdot \lg k = 10 \cdot \lg E_2 \pm 10 \cdot \lg E_1 = 10 \cdot \lg (E_2 \cdot E_1^{\pm 1})$$

czyli:

$$k = E_2 \cdot E_1 \quad \text{lub} \quad k = \frac{E_2}{E_1}$$

Rachunek propagacji niepewności formalnie powinien być przeprowadzany dla niepewności standardowych, ale przy zastosowaniu wszędzie tego samego współczynnika rozszerzenia $k=2$ jest również prawdziwy dla niepewności rozszerzonych:

$$U^2(k) = \left(\frac{\delta k}{\delta E_2} \right)^2 \cdot U^2(E_2) + \left(\frac{\delta k}{\delta E_1} \right)^2 \cdot U^2(E_1)$$

stąd:

$$U^2(k) = (E_1)^2 \cdot U^2(E_2) + (E_2)^2 \cdot U^2(E_1) \quad \text{lub} \quad U^2(k) = \left(\frac{1}{E_1} \right)^2 \cdot U^2(E_2) + \left(\frac{-E_2}{E_1^2} \right)^2 \cdot U^2(E_1)$$

$$U^2(k) = (E_2 \cdot E_1)^2 \cdot \left(\frac{U(E_2)}{E_2} \right)^2 + (E_2 \cdot E_1)^2 \cdot \left(\frac{U(E_1)}{E_1} \right)^2 \quad \text{lub} \quad U^2(k) = \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{U(E_2)}{E_2} \right)^2 + \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{U(E_1)}{E_1} \right)^2$$

w obu przypadkach otrzymujemy:

$$U^2(k) = (k)^2 \cdot \left[\left(\frac{U(E_2)}{E_2} \right)^2 + \left(\frac{U(E_1)}{E_1} \right)^2 \right]$$

Stąd niepewność sumy/różnicy arytmetycznej wynosi:

$$U(k) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{U(E_2)}{E_2} \right)^2 + \left(\frac{U(E_1)}{E_1} \right)^2}$$

Odchylenia granic niepewności dla **sumy arytmetycznej** lub **różnicy arytmetycznej** poziomów dźwięku określają wzory:

jeśli:

$$L = L_2 \pm L_1 \quad \text{oraz} \quad k = 10^{\frac{L}{10}}$$

$$\text{czyli: } L_1 = 10 \cdot \lg E_1 \quad L_2 = 10 \cdot \lg E_2 \quad k = E_2 \cdot E_1^{\pm 1}$$

to:

$$\begin{cases} U^+(L) = 10 \cdot \lg [k + U(k)] - L \\ U^-(L) = 10 \cdot \lg [k - U(k)] - L \end{cases}$$

gdzie:

$$U(k) = 10^{\frac{L}{10}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U(E_2)}{E_2} \right)^2 + \left(\frac{U(E_1)}{E_1} \right)^2}$$

4.8 Niepewność określenia czasu pogłosu

Stosujemy standardowe obliczenia statystyczne z uwzględnieniem rozkładu t-Studenta:

- obliczamy wartość średnią (wartość oczekiwaną):

$$T_{\text{śr.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$$

- obliczamy estymatę średniego odchylenia standardowego **S** wartości średniej zgodnie ze wzorem:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (T_{\text{śr.}} - T_i)^2}$$

- szacujemy niepewność na poziomie ufności 95%, uwzględniając rozkład T-Studenta, korzystając ze wzoru:

$$U_{A,95}(T_{\text{śr.}}) = \tau(n) \cdot s$$

4.9 Niepewność określenia wyniku poziomu wzorcowego $L_{A,nT}$

4.9.1 Niepewność średniego poziomu dla cyklu pracy

Niepewność poziomów uśrednionych wyznaczamy zgodnie z 16.2.2. (pomiar emisji), wartość średnią z 3 punktów wyznaczamy zgodnie ze wzorami z p.16.2.2.4.C.2. dla złożenia niepewności cząstkowych (dla 3 elementów).

$$U_{A95}(E_A) = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^3 [U(E_{Ai})]^2} \quad \text{- dla poziomu dźwięku A}$$

lub

$$U_{95}(E_A) = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^3 [U(E_i)]^2} \quad \text{- dla każdego paśma oktawowego / tercjowego}$$

4.9.2 Niepewność określenia poprawki k do poziomu wzorcowego $L_{A,nT}$

$$L_{A,nT} = L_A - k = L_A - 10 \cdot \lg \frac{T}{T_0}$$

$$U(E_{A,nT}) = 10^{\frac{L}{10}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{A95}(E_A)}{E_A}\right)^2 + \left(\frac{U(T)}{T}\right)^2}$$

4.9.3 Niepewność maksymalnego poziomu wzorcowego $L_{AFmax,nT}$

Ponieważ zgodnie z normą PN-EN ISO 10052:2007-05 +PN-EN ISO 10052:2007/A1:2010 zmierzone wartości poziomu maksymalnego są identycznie uśredniane i korygowane do poziomu wzorcowego jak poziom równoważny dla cyklu pracy, to rachunki są analogiczne.

4.9.4 Niepewność poziomu L_A określanego na podstawie widma oktawowego lub $1/3$ -oktawowego (tercjowego)

Do obliczenia niepewności dla ekspozycji względnych w sumowaniu udziału każdego pasma należy uwzględnić poprawkę dla poziomu A dla danego pasma w postaci współczynnika wrażliwości:

$$U_{A95}(E_A) = \sqrt{\sum_{i=1}^{liczbapasm} [10^{0,1 \cdot A_i} \cdot U(E_i)]^2}$$

gdzie: A_i - poprawka korekcji częstotliwościowej dla pasma i

$U(E_i)$ - niepewność pasma i (z uśredniania wg 4.9.1)

Dla pasm oktawowych:

f, Hz	A_i , *dB*	$B_i = 10^{0,1 \cdot A_i}$
16	-56,7	0,0000
31,5	-39,4	0,0001
63	-26,2	0,002
125	-16,1	0,025
250	-8,6	0,14
500	-3,2	0,48
1000	0,0	1
2000	1,2	1,32
4000	1,0	1,26
8000	-1,1	0,78
16000	-6,6	0,219

Dla pasm $1/3$ -oktawowych (tercjowych):

f, Hz	A_i , *dB*	$B_i = 10^{0,1 \cdot A_i}$
10	-70,4	0,0000001
12,5	-63,4	0,0000005
16	-56,7	0,0000021
20	-50,5	0,0000089
25	-44,7	0,00003
31,5	-39,4	0,00011
40	-34,6	0,00035
50	-30,2	0,0010
63	-26,2	0,0024
80	-22,5	0,0056
100	-19,1	0,012
125	-16,1	0,025
160	-13,4	0,046
200	-10,9	0,081
250	-8,6	0,138
315	-6,6	0,219
400	-4,8	0,33
500	-3,2	0,48
630	-1,9	0,65
800	-0,8	0,83
1000	0,0	1
1250	0,6	1,15
1600	1,0	1,26
2000	1,2	1,32
2500	1,3	1,35
3150	1,2	1,32
4000	1,0	1,26
5000	0,5	1,12
6300	-0,1	0,98
8000	-1,1	0,78
10000	-2,5	0,56
12500	-4,3	0,37
16000	-6,6	0,22
20000	-9,3	0,12

4.10 Niepewność określenia poziomu mocy akustycznej

Metodyka wg:

- PN-EN ISO 3746 (czerwiec 2011) „Akustyka - Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów poziomów ciśnienia akustycznego - **Metoda orientacyjna** z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk”.

4.10.1 Zasada pomiaru

Wymagania środowiskowe:

- $r \geq 1\text{m}$ lub $r \geq 2x d_0$ (wymiar charakterystyczny źródła)
wskazane wartości r [m]: 1, 2, 4, 6 (większe raczej będą trudne do realizacji...)
- $K_{1A} < 3$ tylko dla $\Delta L_A > 3$ dB
- przestrzeń otwarta: $K_{2A} = 0$ (dźwięki odbite są uwzględniane w mierzonym poziomie!)
lub pomieszczenie: $K_{2A} < 7$ lub równoważnie: $S \leq 1,5 \times A$

PN-EN ISO 3746.B1 (powierzchnia półsferyczna nad powierzchnią odbijającą)

- 4 pozycje mikrofonu

PN-EN ISO 3746.B2 i B3

(powierzchnia ćwierćsferyczna lub 1/8-sfery nad powierzchnią odbijającą)

- 3 pozycje mikrofonu

PN-EN ISO 3746.C1 (powierzchnia prostopadłościenna nad powierzchnią odbijającą)

- pozycje mikrofonu wynikające z podziału powierzchni $S / (3d)^2$ - wskazany podział na $(2d)^2$
- wskazane $d = 1\text{m}$, warunek $d > 0,15\text{m}$

UWAGI:

- określanie poprawki na tło akustyczne K_{1A} jest równoważne obliczeniu tzw. „różnicy logarytmicznej” poziomu emisji i tła akustycznego (różnica w wielkościach energetycznych)
- poprawka środowiskowa K_{2A} zgodnie z normą jest określona wzorem:

$$K_{2A} = 10 \cdot \lg \left[1 + 4 \left(\frac{S}{A} \right) \right]$$

gdzie:

- S - powierzchnia pomiarowa wyrażona w wartościach względnych (re $S_0 = 1\text{m}^2$)
- A - chłonność akustyczna pomieszczenia
(dla charakterystyki częstotliwościowej A przyjmować dla 1kHz)

Wzór podstawowy⁷: (uogólniony)

$$L_W = \overline{L_p} + 10 \cdot \lg(S) - K_{2A}$$

gdzie:

- L_W - poziom mocy akustycznej [dB]
- L_p - uśredniony energetycznie poziom dźwięku [dB] dla emisji, na powierzchni pomiarowej S
- K_{2A} - poprawka środowiskowa (przestrzeń otwarta $K_{2A}=0$, pomieszczenie $K_{2A}=10\lg[1+4(S/A)]$)
- S - powierzchnia pomiarowa wyrażona w wartościach względnych (re $S_0=1\text{m}^2$)

Powyższy wzór wyrażony w wielkościach energetycznych:

$$W = E \cdot S \cdot 10^{-\frac{K_{2A}}{10}} \quad \text{lub} \quad W = \frac{E \cdot S}{1 + 4(S/A)}$$

gdzie:

- W - względna moc akustyczna (względem poziomu odniesienia $W_0=10^{-12}\text{W}$)
- E - uśredniona arytmetycznie ekspozycja względna (re $p_0=2 \cdot 10^{-5}\text{Pa}$) dla emisji, na powierzchni pomiarowej S
- K_{2A} - poprawka środowiskowa (przestrzeń otwarta $K_{2A}=0$, pomieszczenie $K_{2A}=10\lg[1+4(S/A)]$)
- S - powierzchnia pomiarowa wyrażona w wartościach względnych (re $S_0=1\text{m}^2$)
- A - chłonność akustyczna pomieszczenia

16.2.1.1. Niepewność typu A

1) $K_{2A}=0$:

$$U_{A95}^2(W) = S^2 \cdot U_{A95}^2(E) + E^2 \cdot U_{A95}^2(S)$$

2) $K_{2A}>0$:

$$U_{A95}^2(W) = \left(\frac{W}{E}\right)^2 \cdot U_{A95}^2(E) + \left(\frac{W}{S}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{1+4S/A}\right)^2 \cdot U_{A95}^2(S) + \left(\frac{W}{A}\right)^2 \cdot \left(\frac{4S}{1+4S/A}\right)^2 \cdot U_{A95}^2(A)$$

lub po podstawieniu K_{2A} :

$$U_{A95}^2(W) = \left(\frac{W}{E}\right)^2 \cdot U_{A95}^2(E) + \left(\frac{W}{S}\right)^2 \cdot 10^{-\frac{K_{2A}}{5}} \cdot U_{A95}^2(S) + \left(\frac{4WS}{A}\right)^2 \cdot 10^{-\frac{K_{2A}}{5}} \cdot U_{A95}^2(A)$$

⁷ wzór przybliżony (ale zgodny z normą!) - nie uwzględnia zależności gęstości powietrza od temperatury

4.10.2 Niepewność ekspozycji dla emisji $u_{A95}(E)$

$$U_{A95}^2(E) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N U_{A95}^2(E_i)$$

gdzie: N - liczba pozycji mikrofonu

Niepewności wyników w każdej pozycji mikrofonu $U_{A95}(E_i)$ określamy wg procedury dla „Serii pomiarowej o stałym czasie pomiaru elementarnego” (rozdział 4.2.1.).

4.10.3 Niepewność określenia powierzchni pomiarowej $u_{A95}(S)$

1) Dla powierzchni półsferycznej $S = 2\pi \cdot r^2$

$$U_{A95}(S) = 4\pi \cdot r \cdot U_{A95}(r)$$

gdzie: $U_{A95}(r)$ - niepewność wyznaczenia promienia r - proponuję przyjąć wartość 0,1 m

2) Dla powierzchni prostopadłościowej $S = ab + 2bc + 2ac$

$$U_{A95}^2(S) = \left[(a+b)^2 + 4 \cdot (b+c)^2 + 4 \cdot (a+c)^2 \right] \cdot U_{A95}^2(d)$$

gdzie: $U_{A95}(d)$ - niepewność pomiarów liniowych - proponuję przyjąć wartość 0,1 m

(Uwaga: prostopadłością powierzchni pomiarowej o wymiarach a x b x c nad powierzchnią odbijającą)

4.10.4 Niepewność określenia chłonności akustycznej $u_{A95}(A)$ - metoda 1

- metoda przybliżona szacowania chłonności na podstawie wymiarów i zagospodarowania pomieszczenia

Rozważamy tu tylko przypadek określania według metody przybliżonej (PN-EN ISO 3746.A.3.2.1):

$$A = \alpha \cdot S_v$$

$$U_{A95}^2(A) = S_v^2 \cdot U_{A95}^2(\alpha) + \alpha^2 \cdot U_{A95}^2(S_v)$$

gdzie: $U_{A95}(\alpha)$ - niepewność oszacowania α - proponuję przyjąć wartość 0,1

$U_{A95}(S_v)$ - niepewność pomiarów liniowych i obliczeń S_v - patrz wyżej dla pow. prostopadłościowej!

4.10.5 Niepewność określenia chłonności akustycznej $u_{A95}(A)$ - metoda 2

- szacowanie chłonności na podstawie pomiaru czasu pogłosu

Rozważamy tu przypadek określania według metody przybliżonej (PN-EN ISO 3746.A.3.2.2):

$$A = 0,16 \cdot \frac{V}{T}$$

gdzie: V - objętość pomieszczenia badawczego w [m³],

T - czas pogłosu pomieszczenia badawczego w [s] - wyznaczony dla dźwięku szerokopasmowego metodą szumu przerywanego lub dźwięku impulsowego, przy charakterystyce częstotliwościowej A

$$U_{A95}^2(A) = \left(\frac{0,16}{T}\right)^2 \cdot U_{A95}^2(V) + \left(\frac{0,16}{T^2}\right)^2 \cdot U_{A95}^2(T)$$

gdzie: $U_{A95}(T)$ - niepewność obliczeń czasu pogłosu T - ze wzorów statystycznych

$U_{A95}(V)$ - niepewność pomiarów liniowych i obliczeń $V = a \times b \times c$:

$$U_{A95}^2(V) = V^2 \cdot \left[\left(\frac{U_{A95}(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{U_{A95}(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{U_{A95}(c)}{c}\right)^2 \right]$$

gdzie: $U_{A95}(a)$, $U_{A95}(b)$, $U_{A95}(c)$ - niepewność pomiarów liniowych - proponuję przyjąć wartość 0,1 m

Niepewność określenia poziomu mocy akustycznej obliczamy według wzorów [H]÷[L] - patrz rozdział 4.2.1.

4.11 Metoda obliczeniowa emisji hałasu do środowiska - Niepewność określenia poziomu mocy akustycznej źródeł na podstawie fizycznego pomiaru poziomu dźwięku przy źródle.

Metodyka wg:

- własna Procedura pomiarowo-obliczeniowa 7.1.3.1.⁸ pt.:
„Badanie emisji hałasu od instalacji lub urządzeń - Metoda obliczeniowa - określanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu (dane do obliczeń)”

Procedura pomiarowa opiera się na inwentaryzacji źródeł hałasu z podziałem na 3 kategorie:

1. Źródło punktowe / powierzchniowe poziome / przestrzenne

$$L_{WAeq,T} = L_{Aeq,zm} + 11 - K_0 + 20 \cdot \lg(r), \text{ dB}$$

gdzie:

- $L_{WAeq,T}$ - równoważny poziom mocy akustycznej A odpowiednio dla pory dziennej ($T=D$) albo nocnej ($T=N$)
- $L_{Aeq,zm}$ - uśrednione energetycznie wyniki pomiarów w odległości r od środka źródła
- K_0 - współczynnik kąta bryłowego emisji wg Instrukcji ITB-338 (dla pomiaru nad powierzchnią odbijającą $K_0 = 3$)
- r - odległość pomiarowa (w metrach) od środka geometrycznego źródła, warunek dla $r^2 \gg l \cdot h$, gdzie l - wymiary poprzeczne źródła, h - wysokość źródła

2. Źródło liniowe

$$L_{WAeqT|1m} = L_{Aeq,zm} + 8 - K_0 + 10 \cdot \lg(d), \text{ dB}$$

$$L_{WAeqT} = L_{WAeqT|1m} + 10 \cdot \lg(D), \text{ dB}$$

gdzie:

- $L_{WAeq,T,1m}$ - równoważny poziom mocy akustycznej A odcinka o długości 1m odpowiednio dla pory dziennej ($T=D$) albo nocnej ($T=N$)
- $L_{Aeq,zm}$ - uśrednione energetycznie wyniki pomiarów w odległości d prostopadle do źródła
- K_0 - współczynnik kąta bryłowego emisji wg Instrukcji ITB-338 (dla pomiaru nad powierzchnią odbijającą $K_0 = 3$)
- d - odległość pomiarowa (w metrach) do środka źródła prostopadle do niego, warunki: dla $d^2 \gg g \cdot h$, gdzie g - głębokość źródła, h - wysokość źródła, dla $6d < l$, gdzie l - długość źródła (dla źródeł poziomych, dla źródeł o innym kierunku zastosować odpowiednio)
- D - długość źródła (w metrach)

3. Źródło powierzchniowe pionowe

$$L_{WAeq,T} = L_{Aeq,zm} + 10 \cdot \lg(S), \text{ dB}$$

gdzie:

- $L_{WAeq,T}$ - równoważny poziom mocy akustycznej A odpowiednio dla pory dziennej ($T=D$) albo nocnej ($T=N$)
- $L_{Aeq,zm}$ - uśrednione energetycznie wyniki pomiarów w świetle źródła lub bardzo blisko niego
- S - powierzchnia źródła (w metrach kwadratowych).

⁸ procedura własna w ramach akredytowanego laboratorium firmy NTL-M.Kirpluk

4.11.1 Niepewność zmierzonego poziomu emisji hałasu

Niepewności wyników pomiarów poziomu dźwięku $U_{A95}(E_i)$ określamy wg procedury dla „Serii pomiarowej o stałym czasie pomiaru elementarnego” (punkt 16.2.2.1. KJ).

4.11.2 Niepewność związana z parametrami geometrycznymi

1. Źródło punktowe / powierzchniowe poziome / przestrzenne

$$W = E \cdot 10^{\frac{11-K_0}{10}} \cdot r^2$$

gdzie:

– W – względna moc akustyczna (względem poziomu odniesienia $W_0=10^{-12}W$)

$$U_{A95}^2(W) = \left(10^{\frac{11-K_0}{10}} \cdot r^2 \right)^2 \cdot U_{A95}^2(E) + 4 \cdot E^2 \cdot \left(10^{\frac{11-K_0}{10}} \cdot r \right)^2 \cdot U_{A95}^2(r)$$

$$U_{A95}^2(W) = \left(\frac{W}{E} \right)^2 \cdot U_{A95}^2(E) + \left(\frac{2 \cdot W}{r} \right)^2 \cdot U_{A95}^2(r)$$

2. Źródło liniowe

$$W = E \cdot 10^{\frac{8-K_0}{10}} \cdot d \cdot D$$

$$U_{A95}^2(W) = W^2 \cdot \left[\left(\frac{U_{A95}(E)}{E} \right)^2 + \left(\frac{U_{A95}(d)}{d} \right)^2 + \left(\frac{U_{A95}(D)}{D} \right)^2 \right]$$

3. Źródło powierzchniowe pionowe

$$W = E \cdot a \cdot h$$

$$U_{A95}^2(W) = W^2 \cdot \left[\left(\frac{U_{A95}(E)}{E} \right)^2 + \left(\frac{U_{A95}(a)}{a} \right)^2 + \left(\frac{U_{A95}(h)}{h} \right)^2 \right]$$

4.12 Metoda obliczeniowa emisji hałasu do środowiska - Niepewność określenia wyniku obliczeniowego poziomu dźwięku w punkcie obserwacji.

4.12.1 Niepewność poziomu mocy akustycznej istniejących źródeł hałasu

Określa się na podstawie pomiarów inwentaryzacyjnych istniejących źródeł wg rozdziału 4.11.

4.12.2 Niepewność poziomu mocy akustycznej źródła typu budynek

(na podstawie pomiarów wewnątrz budynku i oszacowania izolacyjności akustycznych ścian)

1. Niepewności wyników pomiarów poziomu dźwięku $U_{A95}(E_i)$ określamy wg procedury dla „Serii pomiarowej o stałym czasie pomiaru elementarnego” (rozdział 4.2.1.).
2. Niepewność oszacowania izolacyjności akustycznej określamy metodą typu B - należy przyjąć, że przy dobrym oszacowaniu izolacyjności jest to z dokładnością $U_{B95} \approx \pm 3$ dB.

4.12.3 Niepewność poziomu mocy akustycznej źródeł hałasu związanych z transportem

Niepewność oszacowania danych wejściowych określamy:

1. dla danych zewnętrznych - metodą typu B - należy przyjąć $U_{B95} \approx \pm 1$ dB.
2. dla danych uzyskanych pomiarowo - wg niepewności wyniku pomiaru i określenia wskaźników poziomu mocy akustycznej.

4.12.4 Niepewność poziomu mocy akustycznej projektowanych źródeł hałasu

(poza obszarem regulowanym prawnie)

1. źródło punktowe - obejmuje typowe źródło punktowe, zastępcze źródło punktowe (dla wielu źródeł punktowych, dla źródła powierzchniowego poziomego, dla źródła powierzchniowego pionowego, dla źródła przestrzennego)
 2. źródło liniowe,
 3. źródło typu budynek
- przeprowadzić analizę danych i określić niepewność metodą typu B.

4.12.5 Niepewność obliczonego poziomu dźwięku A emitowanego hałasu

4.12.5.1 Niepewność udziałów od poszczególnych źródeł

Po realizacji obliczeń uzyskuje się wynik poziomu dźwięku A w zadanym punkcie obserwacji wraz z histogramem udziału poszczególnych źródeł w emisji hałasu - te udziały są podstawą do określenia niepewności wyniku obliczeniowego.

Rachunek przeprowadza się na ekspozycjach względnych określając granice przedziału ufności **dla każdego z udziałów**, gdzie $L_{\dot{s}r.}$ to wartość danego udziału, a ΔL niepewność poziomu mocy akustycznej źródła tego udziału, wg wzorów:

$$\Delta E_+ = 10^{\frac{L_{\dot{s}r.} + \Delta L_+}{10}} - 10^{\frac{L_{\dot{s}r.}}{10}} = 10^{\frac{L_{\dot{s}r.}}{10}} \cdot \left(10^{\frac{\Delta L_+}{10}} - 1 \right)$$

$$\Delta E_- = 10^{\frac{L_{\dot{s}r.}}{10}} - 10^{\frac{L_{\dot{s}r.} - \Delta L_-}{10}} = 10^{\frac{L_{\dot{s}r.}}{10}} \cdot \left(1 - 10^{\frac{-\Delta L_-}{10}} \right)$$

4.12.5.2 Niepewność skuteczności ekranowania

W przypadku wystąpienia ekranowania - np. program HPZ podaje obliczoną skuteczność ekranowania dla danego źródła-udziału w danym punkcie obserwacji - to należy dodatkowo uwzględnić ten fakt dla tego udziału wg powyższych wzorów z uwzględnieniem niepewności ekranowania wyrażonego w skali decybelowej.

Z uwagi na znany fakt, że wzory na skuteczność ekranowania, implementowane w programach obliczeniowych wg normy 9613-2 czy instrukcji ITB-338, są zdecydowanie nadmiarowe, to w laboratorium NTL-M.Kirpluk przyjmuje się założenie, że niedokładność (niepewność) ekranowania wyraża się jako 20% (założenie *a priori*) wynikowej skuteczności wyrażonej liczbowo w decybelach.

4.12.5.3 Składanie niepewności wynikowej

Składanie niepewności udziałów odbywa się standardowo jako pierwiastek z sumy kwadratów.

Następnie przelicza się to z powrotem na przestrzeń poziomów dźwięku wg 16.2.2.1 zgodnie z zasadą od [H] do [L'].

4.13 Niepewność określenia wskaźnika izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych

Izolacyjność akustyczna właściwa przybliżona R'_w

- wskaźnik ważony izolacyjności akustycznej właściwej R' określa się dla pasm tercjowych:

$$[1] \quad R'_w = L_{A\,nad.} - L_{A\,odb.} + 10 \lg \left(\frac{S}{A} \right)$$

gdzie:

- R'_w - wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej przegrody [dB]
- $L_{A\,nad.}$ - poziom dźwięku A w pomieszczeniu nadawczym (ze źródłami hałasu) [dB]
- $L_{A\,odb.}$ - poziom dźwięku A w pomieszczeniu odbiorczym (przyległym przez przegrodę) [dB]
- S - powierzchnia przegrody [m²]
- A - chłonność akustyczna pomieszczenia odbiornika [m²]

Zależność chłonności akustycznej od czasu pogłosu opisuje wzór Sabine'a:

$$[2] \quad A = \frac{0,16 \cdot V}{T}$$

gdzie:

- A - chłonność akustyczna pomieszczenia odbiornika [m²]
- V - objętość pomieszczenia odbiornika [m³]
- T - czas pogłosu w pomieszczeniu odbiornika (czas w jakim po gwałtownym wyłączeniu źródła hałasu poziom dźwięku w pomieszczeniu spada o 60 dB ze stanu nasycenia) [s]

Składając wzory [1] i [2] otrzymujemy wzór wynikowy:

$$R'_w = L_{A\,nad.} - L_{A\,odb.} + 10 \lg \left(\frac{S \cdot T}{0,16 \cdot V} \right)$$

Powyższy wzór wyrażony w wielkościach energetycznych:

$$r = 10^{\frac{R'_w}{10}} = \frac{E_{A\,nad.}}{E_{A\,odb.}} \cdot \frac{S \cdot T}{0,16 \cdot V}$$

Niepewność **standardowa** w wielkościach energetycznych (u - niepewność standardowa):

$$u(r) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial r}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{r}{x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} = r \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2}$$

Niepewność **rozszerzona (k=2)** po transformacji do przestrzeni poziomów dźwięku:

$$\begin{aligned}
 U(R^\pm) &= 10 \lg[r \pm 2u(r)] - 10 \lg(r) = \\
 &= 10 \lg \left[r \pm 2r \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right] - 10 \lg(r) = \\
 &= 10 \lg \left[r \left(1 \pm 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right) \right] - 10 \lg(r) = \\
 &= 10 \lg(r) + 10 \lg \left[1 \pm 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right] - 10 \lg(r) = \\
 &= 10 \lg \left[1 \pm 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right] = 10 \lg \left[1 \pm \sqrt{\sum_i \left(\frac{U(x_i)}{x_i} \right)^2} \right]
 \end{aligned}$$

$$U(R^\pm) = 10 \lg \left[1 \pm 2 \sqrt{\left(\frac{u(E_{nad})}{E_{nad}} \right)^2 + \left(\frac{u(E_{odb})}{E_{odb}} \right)^2 + \left(\frac{u(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S} \right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V} \right)^2} \right]$$

gdzie $u()$ - niepewności standardowe

lub

$$U(R^\pm) = 10 \lg \left[1 \pm \sqrt{\left(\frac{U(E_{nad})}{E_{nad}} \right)^2 + \left(\frac{U(E_{odb})}{E_{odb}} \right)^2 + \left(\frac{U(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{U(S)}{S} \right)^2 + \left(\frac{U(V)}{V} \right)^2} \right]$$

gdzie $U()$ - niepewności rozszerzone (U_{95})

Uwzględniając niepewności wskaźnika izolacyjności akustycznej - odpowiednio dodane albo odjęte od wartości wyznaczonej z badania dla każdego pasma tercjowego - uzyskujemy dwie dodatkowe krzywe izolacyjności akustycznej: „najkorzystniejszą” i „najniekorzystniejszą” - wykreślone po obwiedniach przedziałów niepewności dla każdego pasma tercjowego.

Uwaga: czasami (zwłaszcza po stronie nadawczej) mamy bardzo duże rozrzuty wyników z uwagi na niejednorodność pola akustycznego, a wydłużanie czasu próbki lub zwiększanie liczby pomiarów jest niecelowe dla realizowanego badania, to do określenia dolnych odchyłeń wskaźników R' dla każdego pasma stosujemy następujący algorytm:

- wszystkie wartości niepewności dążące do $-\infty$ (nieokreślone) zamieniamy na jedną wartość odpowiadającą najbardziej niekorzystnej niepewności w dół z pozostałych wartości po odzuceniu wartości nieokreślonych).

Jest to **PROCEDURA UMOWNA** dająca akceptowalne wyniki niepewności badania (dolne).

Dla każdej krzywej wyznaczamy zgodnie z normą wartość wskaźnika izolacyjności akustycznej (z dokładnością do 0,1 dB) i tak uzyskane wskaźniki wyznaczają przedział niepewności o poziomie ufności **co najmniej 95%** - odchylenia górnej i dolnej granicy przedziału od zmierzonej wartości wskaźnika izolacyjności akustycznej określamy addytywnie (z dokładnością do 0,1 dB) i przedstawiamy jako:

$$R'_w \left\{ +U(R^+); -U(R^-) \right\}$$

UWAGA: zgodnie z formalnymi wymaganiami dokumentu EA-04/16:2003 wg pktu 7.7 w raportach wynik wraz z niepewnością należy przedstawiać w postaci:

$$R'_w + U_{+R,95}; - U_{-R,95}, \text{ dB}$$

Na dzień dzisiejszy w tut. laboratorium nie jest znany dokładniejszy sposób złożenia niepewności dla wskaźnika izolacyjności akustycznej.

4.14 Niepewność określenia wskaźnika izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych

Poziom uderzeniowy znormalizowany

- „wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego znormalizowanego przybliżonego” $L'_{n,w}$

lub „jednoliczbowy wskaźnik ważony izolacyjności od dźwięków uderzeniowych” określa się dla pasm tercjowych:

$$[1] \quad L'_n = L'_{odb} - 10 \log_{10} \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

gdzie:

- L'_n - znormalizowany poziom dźwięku A [dB]
- L'_{odb} - zmierzony poziom dźwięku w paśmie tercjowym [dB]
- A_0 - 10 m^2 - chłonność akustyczna odniesienia
- A - chłonność akustyczna pomieszczenia odbiornika [m^2]

Zależność chłonności akustycznej od czasu pogłosu opisuje wzór Sabine'a:

$$[2] \quad A = \frac{0,16 \cdot V}{T}$$

gdzie:

- A - chłonność akustyczna pomieszczenia odbiornika [m^2]
- V - objętość pomieszczenia odbiornika [m^3]
- T - czas pogłosu w pomieszczeniu odbiornika (czas w jakim po gwałtownym wyłączeniu źródła hałasu poziom dźwięku w pomieszczeniu spada o 60 dB ze stanu nasycenia) [s]

Składając wzory [1] i [2] otrzymujemy wzór wynikowy:

$$L'_n = L'_{odb} - 10 \log_{10} \left(\frac{A_0 \cdot T}{0,16 \cdot V} \right)$$

Powyższy wzór wyrażony w wielkościach energetycznych:

$$l = 10^{\frac{L'_n}{10}} = \frac{L_{odb}}{10} \cdot \frac{0,16 \cdot V}{T} = \frac{0,016 \cdot L_{odb} \cdot V}{T}$$

Niepewność **standardowa** w wielkościach energetycznych (u - niepewność standardowa):

$$u(l) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial l}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{l}{x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} = l \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2}$$

Niepewność **rozszerzona (k=2)** po transformacji do przestrzeni poziomów dźwięku:

$$\begin{aligned}
 U(L^\pm) &= 10 \lg [l \pm 2u(l)] - 10 \lg(l) = \\
 &= 10 \lg \left[l \pm 2l \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right] - 10 \lg(l) = \\
 &= 10 \lg \left[l \left(1 \pm 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right) \right] - 10 \lg(l) = \\
 &= 10 \lg(l) + 10 \lg \left[1 \pm 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right] - 10 \lg(l) = \\
 &= 10 \lg \left[1 \pm 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \right] = 10 \lg \left[1 \pm \sqrt{\sum_i \left(\frac{U(x_i)}{x_i} \right)^2} \right]
 \end{aligned}$$

$$U(R^\pm) = 10 \lg \left[1 \pm 2 \sqrt{\left(\frac{u(E_{odb})}{E_{odb}} \right)^2 + \left(\frac{u(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V} \right)^2} \right]$$

gdzie $u()$ - niepewności standardowe

lub

$$U(R^\pm) = 10 \lg \left[1 \pm \sqrt{\left(\frac{U(E_{odb})}{E_{odb}} \right)^2 + \left(\frac{U(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{U(V)}{V} \right)^2} \right]$$

gdzie $U()$ - niepewności rozszerzone (U_{95})

Uwzględniając niepewności wskaźnika poziomu znormalizowanego - odpowiednio dodane albo odjęte od wartości wyznaczonej z badania dla każdego pasma tercjowego - uzyskujemy dwie dodatkowe krzywe poziomu znormalizowanego: „najkorzystniejszą” i „najniekorzystniejszą” - wykreślone po obwiedniach przedziałów niepewności dla każdego pasma tercjowego.

Uwaga: czasami (zwłaszcza po stronie nadawczej) mamy bardzo duże rozrzuty wyników z uwagi na niejednorodność pola akustycznego, a wydłużanie czasu próbki lub zwiększanie liczby pomiarów jest niecelowe dla realizowanego badania, to do określenia dolnych odchyłeń wskaźników R' dla każdego pasma stosujemy następujący algorytm:

- wszystkie wartości niepewności dążące do $-\infty$ (nieokreślone) zamieniamy na jedną wartość odpowiadającą najbardziej niekorzystnej niepewności w dół z pozostałych wartości po odzuceniu wartości nieokreślonych).

Jest to **PROCEDURA UMOWNA** dająca akceptowalne wyniki niepewności badania (dolne).

Dla każdej krzywej wyznaczamy zgodnie z normą wartość wskaźnika poziomu znormalizowanego (z dokładnością do 0,1 dB) i tak uzyskane wskaźniki wyznaczają przedział niepewności o poziomie ufności **co najmniej 95%** - odchylenia górnej i dolnej granicy przedziału od zmierzonej wartości wskaźnika poziomu znormalizowanego określamy addytywnie (z dokładnością do 0,1 dB) i przedstawiamy jako:

$$L'_n \{ +U(L^+); -U(L^-) \}$$

UWAGA: zgodnie z formalnymi wymaganiami dokumentu EA-04/16:2003 wg pktu 7.7 w raportach wynik wraz z niepewnością należy przedstawiać w postaci:

$$L'_n + U(L^+); -U(L^-), \text{ dB}$$

Na dzień dzisiejszy w tut. laboratorium nie jest znany dokładniejszy sposób złożenia niepewności dla wskaźnika poziomu znormalizowanego.

5. Metodyka typu B wyznaczania niepewności pomiaru (EA-4/02:2013)

Jest to szacowanie niepewności o asymetrycznych granicach przedziału ufności względem wartości średniej, co wynika z faktu określania wartości średniej jako średniej energetycznej.

5.1 Źródła niepewności typu B

Niepewność wyznaczana metodą B, nazywana dalej **niepewnością typu B**⁹ (oznaczana jako U_B), jest związana z niedokładnością przyrządów pomiarowych, procedur badawczych i przyjmowanych modeli zjawisk akustycznych.

Sposoby określania tej niepewności powodują, że „szacowanie niepewności typu B to bardziej sztuka doświadczalna niż rzemiosło” [4] i określamy ją metodami innymi niż statystyki matematycznej - podstawą dla tych szacunków są:

- metryki, certyfikaty,
- dane literaturowe,
- wcześniej uzyskane dane pomiarowe,
- własne doświadczenie i wiedza,
- szczegółowa znajomość badanych zjawisk.

zostawiono w tekście pustą przestrzeń ze względów edycyjnych

⁹ ze względów edycyjnych i wygody pozostawiono w całym tekście określenie „niepewność typu B”

5.2 Sposób obliczania - ekspozycja względna

Dla znanych niepewności dla poziomów dźwięku, ze wzoru [B] otrzymujemy wzory na niepewności dla ekspozycji względnych (w przypadku ogólnym):

- wartość górna niepewności dla ekspozycji względnej:

$$\Delta E_+ = 10^{\frac{L_{\text{śr.}} + \Delta L_+}{10}} - 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{10}} = 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{10}} \cdot \left(10^{\frac{\Delta L_+}{10}} - 1 \right) \quad [\text{R1}]$$

- wartość dolna niepewności dla ekspozycji względnej:

$$\Delta E_- = 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{10}} - 10^{\frac{L_{\text{śr.}} + \Delta L_-}{10}} = 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{10}} \cdot \left(1 - 10^{\frac{\Delta L_-}{10}} \right) \quad [\text{R2}]$$

gdzie: ΔL_- jest ujemna (<0) !

Ponieważ występuje tu zależność od aktualnej wartości poziomu dźwięku, to wygodniejszą formą przedstawiania niepewności typu B będzie niepewność względna (względem wartości ekspozycji względnej) dla ekspozycji względnej (względem kwadratu ciśnienia odniesienia $p_0=2 \cdot 10^{-5}$ Pa):

- wartość górna niepewności względnej dla ekspozycji względnej:

$$\frac{\Delta E_+}{E} = 10^{\frac{\Delta L_+}{10}} - 1 \quad [\text{S1}]$$

- wartość dolna niepewności względnej dla ekspozycji względnej:

$$\frac{\Delta E_-}{E} = 1 - 10^{\frac{\Delta L_-}{10}} \quad [\text{S2}]$$

gdzie: ΔL_- jest ujemna (<0) !

5.3 Sposób obliczania - udziały

Dla podanych / założonych / oszacowanych niepewności typu B wyrażonych jako odchylenia poziomów dźwięku otrzymujemy następujące standardowe niepewności względne typu B dla ekspozycji względnych, przy założeniu takich samych odchyień, górnego i dolnego, dla poziomów dźwięku - wyrażane w jednostkach względnych:

$$\begin{cases} \frac{u(E)^+}{E} = \frac{10^{\frac{\Delta L}{10}} - 1}{k} \\ \frac{u(E)^-}{E} = \frac{u(E)^+}{E} \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}} \end{cases}$$

UWAGA: wartość ΔL jest dodatnia!

Po uwzględnieniu przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa dla danego udziału, otrzymujemy następujące wzory:

- dla zjawiska, dla którego rozkład gęstości prawdopodobieństwa jest modelowany „**rozkładem normalnym**”:

$$(\Delta L_+ = -\Delta L_- = \Delta L) \Rightarrow \begin{cases} \frac{u_B^+(E)}{E} = \left(10^{\frac{\Delta L}{10}} - 1\right) \cdot \frac{1}{2} \\ \frac{u_B^-(E)}{E} = \frac{u_B^+(E)}{E} \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}} \end{cases} \quad [T1]$$

- dla zjawiska, dla którego rozkład gęstości prawdopodobieństwa jest modelowany „**prostokątem**”:

$$(\Delta L_+ = -\Delta L_- = \Delta L) \Rightarrow \begin{cases} \frac{u_B^+(E)}{E} = \left(10^{\frac{\Delta L}{10}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{u_B^-(E)}{E} = \frac{u_B^+(E)}{E} \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}} \end{cases} \quad [T2]$$

- dla zjawiska, dla którego rozkład gęstości prawdopodobieństwa jest modelowany „**trójkątem**”:

$$(\Delta L_+ = -\Delta L_- = \Delta L) \Rightarrow \begin{cases} \frac{u_B^+(E)}{E} = \left(10^{\frac{\Delta L}{10}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{u_B^-(E)}{E} = \frac{u_B^+(E)}{E} \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}} \end{cases} \quad [T3]$$

5.4 Sposób obliczania - sumowanie udziałów

- określenie niepewności względnej wynikowej typu B dla **W** uwzględnionych czynników wymaga przeprowadzenia rachunków na niepewnościach standardowych ekspozycji względnych osobno dla granicy górnej i dla granicy dolnej:

$$\frac{u_B^+(E)}{E} = \sqrt{\sum_{j=1}^w \left[\frac{u_B^+(E_j)}{E} \right]^2} \quad [\text{U1}]$$

$$\frac{u_B^-(E)}{E} = \sqrt{\sum_{j=1}^w \left[\frac{u_B^-(E_j)}{E} \right]^2} \quad [\text{U2}]$$

- z otrzymanych ze wzorów [U1] i [U2] złożonych niepewności standardowych otrzymujemy niepewność rozszerzoną o poziomie ufności 95% przy zastosowaniu współczynnika rozszerzenia **k=2**:

$$\frac{U_{B,95}^+(E)}{E} = 2 \cdot \frac{u_B^+(E)}{E} \quad [\text{V1}]$$

$$\frac{U_{B,95}^-(E)}{E} = 2 \cdot \frac{u_B^-(E)}{E} \quad [\text{V2}]$$

- Mając wynikowe niepewności względne o poziomie ufności 95% dla ekspozycji względnych można określić wartości niepewności wynikowej (górną i dolną) dla poziomów dźwięku:

$$U_{B,95}^+(L) = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{U_{B,95}^+(E)}{E} \right) \quad [\text{W1}]$$

$$U_{B,95}^-(L) = 10 \cdot \lg \left(1 - \frac{U_{B,95}^-(E)}{E} \right) \quad [\text{W2}]$$

5.5 Sposób obliczania - szczytowe ciśnienie akustyczne względne

Dla znanych niepewności dla poziomów dźwięku, ze wzoru [B] otrzymujemy wzory na niepewności dla **szczytowego ciśnienia akustycznego względnego** (dalej nazywane „ciśnieniem względnym”):

- wartość górna niepewności dla ciśnienia względnego:

$$\Delta P_+ = 10^{\frac{L_{\text{śr.}} + \Delta L_+}{20}} - 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{20}} = 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{20}} \cdot \left(10^{\frac{\Delta L_+}{20}} - 1 \right) \quad [\text{Rb1}]$$

- wartość dolna niepewności dla ciśnienia względnego:

$$\Delta P_- = 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{20}} - 10^{\frac{L_{\text{śr.}} + \Delta L_-}{20}} = 10^{\frac{L_{\text{śr.}}}{20}} \cdot \left(1 - 10^{\frac{\Delta L_-}{20}} \right) \quad [\text{Rb2}]$$

gdzie: ΔL_- jest ujemna (<0) !

Ponieważ występuje tu zależność od aktualnej wartości poziomu dźwięku, to wygodniejszą formą przedstawiania niepewności typu B będzie niepewność względna (względem wartości **ciśnienia względnego**) dla ciśnienia względnego (względem ciśnienia odniesienia $p_0=2 \cdot 10^{-5}$ Pa):

- wartość górna niepewności względnej dla ciśnienia względnego:

$$\frac{\Delta P_+}{P} = 10^{\frac{\Delta L_+}{20}} - 1 \quad [\text{Sb1}]$$

- wartość dolna niepewności względnej dla ciśnienia względnego:

$$\frac{\Delta P_-}{P} = 1 - 10^{\frac{\Delta L_-}{20}} \quad [\text{Sb2}]$$

gdzie: ΔL_- jest ujemna (<0) !

Dla zjawisk o różnych rozkładach prawdopodobieństwa charakter rozkładów przyjętych dla **ekspozycji względnych** będzie automatycznie przeniesiony na **ciśnienia względne**.

W tutejszym laboratorium na obecnym etapie rozpoznania zjawisk fizycznych dotyczących ciśnień szczytowych nie ma przesłanek, żeby miały się one zachowywać statystycznie inaczej niż ekspozycje (wartości średnioenergetyczne) - stąd przyjmuje się takie same rozkłady w modelowaniu budżetu typu B dla **ciśnień względnych**.

- określenie niepewności względnej wynikowej typu B dla **W** uwzględnionych czynników wymaga przeprowadzenia rachunków na niepewnościach standardowych **ciśnień względnych** osobno dla granicy górnej i dla granicy dolnej:

$$\frac{u_B^+(P)}{P} = \sqrt{\sum_{j=1}^w \left[\frac{u_B^+(P_j)}{P} \right]^2} \quad [\text{Ub1}]$$

$$\frac{u_B^-(P)}{P} = \sqrt{\sum_{j=1}^w \left[\frac{u_B^-(P_j)}{P} \right]^2} \quad [\text{Ub2}]$$

- z otrzymanych ze wzorów [U1] i [U2] złożonych niepewności standardowych otrzymujemy niepewność rozszerzoną o poziomie ufności 95% przy zastosowaniu współczynnika rozszerzenia **k=2**:

$$\frac{U_{B,95}^+(P)}{P} = 2 \cdot \frac{u_B^+(P)}{P} \quad [\text{Vb1}]$$

$$\frac{U_{B,95}^-(P)}{P} = 2 \cdot \frac{u_B^-(P)}{P} \quad [\text{Vb2}]$$

- Mając wynikowe niepewności względne o poziomie ufności 95% dla **ciśnień względnych** można określić wartości niepewności wynikowej (górną i dolną) dla poziomów dźwięku:

$$U_{B,95}^+(L) = 20 \cdot \lg \left(1 + \frac{U_{B,95}^+(P)}{P} \right) \quad [\text{Wb1}]$$

$$U_{B,95}^-(L) = 20 \cdot \lg \left(1 - \frac{U_{B,95}^-(P)}{P} \right) \quad [\text{Wb2}]$$

5.6 Oszacowanie niepewności typu B

dla sprzętu i procedur stosowanych przez LB firmy **NTL-M.Kirpluk** - zawiera Załącznik 1.

Literatura:

- Księga Jakości laboratorium firmy NTL-M.Kirpluk
- „Statystyka w pomiarach akustycznych - podstawy”
Mikołaj Kirpluk
- referat opublikowany w Materiałach XXXIV Zimowej Szkoły Zagrożeń Wibroakustycznych (luty 2006)
- „Szacowanie niepewności przy pomiarze i określaniu poziomu równoważnego”
Mikołaj Kirpluk
- referat opublikowany w Materiałach XXXV Zimowej Szkoły Zagrożeń Wibroakustycznych (luty 2007)
- „Matematyka - Poradnik encyklopedyczny” - I.N.Bronsztejn, K.A.Siemiendiajew
(PWN, Warszawa 1976)
- „Statystyka dla fizyków” - Roman Nowak
(Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002) ISBN 83-01-13702-9
- „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik.”
(GUM, 1999) ISBN 83-906546-1-x
- dokument EA-04/16:2003 „Wytoczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych”
- „Kombinatoryka i rachunek prawdopodobieństwa” T.Gerstenkorn, T.Śródka
(PWN, Warszawa 1972) ISBN 83-01-00204-2
- Tablice matematyczne - praca zbiorowa pod red. Witolda Mizierskiego
(Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 2004) ISBN 83-7350-048-0
- Materiały szkoleniowe - Szkolenie L/103/09 (25-28.08.2009r.) pt. „Ekspert walidacji metod analitycznych i wyznaczania niepewności. Techniki statystyczne.”
- wykładowca: prof.Sabina Żebrowska-Łucyk

6. Załącznik 1

- budżety typu B laboratorium NTL-M.Kirpluk

6.1 środowisko / maszyny i urządzenia - pomiar LEQ/SEL

						rachunek na niepewnościach standardowych dla ekspozycji względnych	
Działanie / czynność / sprzęt			parametr	wartość ±dB	współcz. niepewn.	+U _B	-U _B
						ΔE ₊ / E	ΔE ₋ / E
1. Wzorcowanie aparatury pomiarowej:	a	niepewność wzorca	U _{R95}	0,11	2	1,283E-02	1,251E-02
	b	rozrzut wyników sprawdzenia toru pomiarowego	ΔL _{max}	0,05	1,73	6,693E-03	6,617E-03
	c	niepewność wynikająca z przyjętej tolerancji sprawdzenia toru pomiarowego względem wartości ze świadectwa wzorcowania	ΔL _{max}	0,3	1,73	4,134E-02	3,858E-02
2. Wykonanie pomiarów w istniejących warunkach środowiska	a	wpływ ciśnienia atmosferycznego		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00
	b	wpływ temperatury		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00
	c	wpływ zmian wilgotności		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00
	d	wpływ czasu pracy		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00
	e	wpływ ch-ki częstotliwościowej	ΔL _{max}	0,5	1,73	7,053E-02	6,286E-02
	f	wpływ charakterystyki kierunkowości mikrofonu	ΔL _{max}	0,1	1,73	1,346E-02	1,316E-02
	g	błędy liniowości	U _{R95}	0,2	2	2,356E-02	2,250E-02
	h	rozrzut wyników wskazań zestawu pomiarowego	ΔL _{max}	0,05	1,73	6,693E-03	6,617E-03
3. Inne czynniki	a	nie uwzględniano			1	0,000E+00	0,000E+00
	b	nie uwzględniano			1	0,000E+00	0,000E+00
	c	nie uwzględniano			1	0,000E+00	0,000E+00
4. Obliczenia wyników końcowych			ΔL _{max}	0,05	1,73	6,693E-03	6,617E-03
Łączna niepewność U_B wyniku pomiaru:					U _B	8,786E-02	8,005E-02
LEGENDA:	przybliżenie "rozkładem normalnym"		U _{R95}	2	U _{B,95}	1,757E-01	1,601E-01
	przybliżenie "prostokątne"		ΔL _{max}	1,73			
	przybliżenie "trójkątne"		ΔL _{max}	2,45			
	odchylenie standardowe		σ	1			
	pozycja pominięta			0			
						odchylenia do granic przedziałów wyrażonych w decybelach:	
						+0,70	-0,76

6.2 stanowiska pracy - pomiar LEQ/SEL, LMAX i LCpeak

Działanie / czynność / sprzęt					rachunek na niepewnościach standardowych dla ekspozycji względnych		rachunek na niepewnościach standardowych dla ciśnień względnych			
					parametr	wartość \pm dB	współcz. niepewn.	+U _B $\Delta E_+ / E$	-U _B $\Delta E_- / E$	+U _B $\Delta P_+ / P$
1. Wzorcowanie aparatury pomiarowej:	a	niepewność wzorca	U _{R95}	0,11	2	1,283E-02	1,251E-02	6,372E-03	6,292E-03	
	b	rozrzut wyników sprawdzenia toru pomiarowego	ΔL_{max}	0,05	1,73	6,693E-03	6,617E-03	3,337E-03	3,318E-03	
	c	niepewność wynikająca z przyjętej tolerancji sprawdzenia toru	ΔL_{max}	0,3	1,73	4,134E-02	3,858E-02	2,031E-02	1,962E-02	
2. Wykonanie pomiarów w istniejących warunkach środowiska	a	wpływ ciśnienia atmosferycznego		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	
	b	wpływ temperatury		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	
	c	wpływ zmian wilgotności		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	
	d	wpływ czasu pracy		0	2,45	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	
	e	wpływ ch-ki częstotliwościowej	ΔL_{max}	0,5	1,73	7,053E-02	6,286E-02	3,425E-02	3,233E-02	
	f	wpływ charakterystyki kierunkowości mikrofonu	ΔL_{max}	0,1	1,73	1,346E-02	1,316E-02	6,693E-03	6,617E-03	
	g	błędy liniowości	U _{R95}	0,2	2	2,356E-02	2,250E-02	1,165E-02	1,138E-02	
	h	rozrzut wyników wskazań zestawu pomiarowego	ΔL_{max}	0,05	1,73	6,693E-03	6,617E-03	3,337E-03	3,318E-03	
3. Inne czynniki	a	niedokładność pozycji mikrofonu		1	1	2,589E-01	2,057E-01	1,220E-01	1,087E-01	
	b	nie uwzględniano			1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	
	c	nie uwzględniano			1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	
4. Obliczenia wyników końcowych			ΔL_{max}	0,05	1,73	6,693E-03	6,617E-03	3,337E-03	3,318E-03	
Łączna niepewność U_B wyniku pomiaru:					U _B	2,734E-01	2,207E-01	1,293E-01	1,163E-01	
przybliżenie "rozkładem normalnym"					U _{R95}	2	U _{B,95}	5,469E-01	4,414E-01	
przybliżenie "prostokątne"					ΔL_{max}	1,73				
przybliżenie "trójkątne"					ΔL_{max}	2,45				
odchylenie standardowe					σ	1				
pozycja pominięta						0				
							odchylenia do granic przedziałów wyrażonych w decybelach:	odchylenia do granic przedziałów wyrażonych w decybelach:		
							+1,89	-2,53	+2,00	-2,30

7. Załącznik 2

- współczynniki rozkładu T-Studenta

liczba próbek n	stopnie swobody $\nu = n-1$	τ (95%)
1	0	?
2	1	12,71
3	2	4,30
4	3	3,18
5	4	2,78
6	5	2,57
7	6	2,45
8	7	2,36
9	8	2,31
10	9	2,26
15	14	2,14
20	19	2,09
25	24	2,06
30	29	2,05
40	39	2,02
50	49	2,01
55	54	2,00
100	99	1,98
∞	∞	1,960

[Excel]: =ROZKŁAD.T.ODW(1-0,95;n-1)
lub =ROZKŁ.T.ODWR(0,975;n-1)

8. Załącznik 3

- współczynniki częstotliwościowych krzywych korekcyjnych

<i>f real</i>	f, Hz	A, dB	B, dB	C, dB	D, dB	G, dB
	0,25					-88,0
	0,315					-80,0
	0,4					-72,1
	0,5					-64,3
	0,63					-56,6
	0,8					-49,5
	1					-43,0
	1,25					-37,5
	1,6					-32,6
	2					-28,3
	2,5					-24,1
	3,15					-20,0
	4					-16,0
	5					-12,0
	6,3					-8,0
	8					-4,0
10	10	-70,4	-38,2	-14,3	-26,6	0,0
13,59	12,5	-63,4	-33,2	-11,2	-24,6	4,0
15,85	16	-56,7	-28,5	-8,5	-22,6	7,7
19,95	20	-50,5	-24,2	-6,2	-20,6	9,0
25,12	25	-44,7	-20,4	-4,4	-18,7	3,7
31,62	31,5	-39,4	-17,1	-3,0	-16,7	-4,0
39,81	40	-34,6	-14,2	-2,0	-14,7	-12,0
50,12	50	-30,2	-11,6	-1,3	-12,8	-20,0
63,1	63	-26,2	-9,3	-0,8	-10,9	-28,0
79,43	80	-22,5	-7,4	-0,5	-9,0	-36,0
100	100	-19,1	-5,6	-0,3	-7,2	-44,0
125,9	125	-16,1	-4,2	-0,2	-5,5	-52,0
158,5	160	-13,4	-3,0	-0,1	-4,0	-60,0
199,5	200	-10,9	-2,0	0,0	-2,6	-68,0
251,2	250	-8,6	-1,3	0,0	-1,6	-76,0
316,2	315	-6,6	-0,8	0,0	-0,8	-84,0
398,1	400	-4,8	-0,5	0,0	-0,4	
501,2	500	-3,2	-0,3	0,0	-0,3	
631	630	-1,9	-0,1	0,0	-0,5	
794,3	800	-0,8	0,0	0,0	-0,6	
1000	1000	0,0	0,0	0,0	0,0	
1259	1250	0,6	0,0	0,0	2,0	
1585	1600	1,0	0,0	-0,1	4,9	
2005	2000	1,2	-0,1	-0,1	7,9	
2512	2500	1,3	-0,2	-0,2	10,4	
3162	3150	1,2	-0,4	-0,4	11,6	
3981	4000	1,0	-0,7	-0,7	11,1	
5012	5000	0,5	-1,2	-1,2	9,6	
6310	6300	-0,1	-1,9	-1,9	7,6	
7943	8000	-1,1	-2,9	-2,9	5,5	
10000	10000	-2,5	-4,3	-4,3	3,4	
12590	12500	-4,3	-6,1	-6,2	1,4	
15850	16000	-6,6	-8,4	-8,5	-0,7	
19950	20000	-9,3	-11,1	-11,2	-2,7	