



Wydział Fizyki
Instytut Akustyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

**Krótko- i długookresowe wskaźniki
oceny hałasu lotniczego**

Michał Gałuszka

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor: prof. dr hab. Rufin Makarewicz

Poznań 2014

*Pracę dedykuję moim
Rodzicom*

PODZIĘKOWANIA

Dziękuję mojemu promotorowi Panu Profesorowi Rufinowi Makarewiczowi za wsparcie, życzliwość i cierpliwość oraz pomoc przy wykonywaniu tej pracy.

Pragnę również podziękować, wszystkim koleżankom, kolegom i współpracownikom z Instytutu Akustyki za liczne dyskusje oraz miłą i przyjazną atmosferę na co dzień, która pozwoliła mi zrealizować przedstawione badania. Szczególne podziękowania należą się Piotrowi Kokowskiemu oraz Romanowi Gołębiowskiemu, którzy często służyli mi radą oraz konstruktywnymi uwagami.

Nie do przecenienia jest też wsparcie całej mojej rodziny oraz wszystkich przyjaciół i bliskich mi osób, których pozytywne słowo było dla mnie często źródłem motywacji.

Spis treści

1. Wstęp.....	6
1.1. Przedmiot badań	6
1.2. Teza, zakres i cele pracy	8
2. Podstawowe wzory i definicje	11
2.1. Poziom ciśnienia akustycznego i poziom dźwięku A.....	11
2.2. Ekspozycyjny poziom hałasu – wskaźnik krótkoterminowy.....	13
2.3. Równoważny poziom dźwięku.....	14
2.4. Długookresowy poziom dźwięku L_{DWN} i L_N	16
3. Związek między wskaźnikami długookresowymi a krótkookresowym	18
4. Aktualny stan wiedzy	21
4.1. Wskaźniki oceny hałasu lotniczego.....	21
4.2. Estymacja wskaźników długookresowych na podstawie pomiarów krótkotrwałych	25
4.3. Analiza rozkładów statystycznych wskaźników oceny hałasu.....	33
4.4. Określanie niepewności złożonej, minimalizacja niepewności pomiaru	36
5. Dane pomiarowe.....	39
5.1. Opis bazy danych oraz metodyki pomiarowej.....	39
5.2. Rzeczywiste wartości wskaźników LDWN oraz LN	46
6. Metody oceny estymacji.....	49
6.1. Klasyczna ocena estymacji	49
6.2. Ocena estymacji w oparciu o estymator jądrowy gęstości	50
6.3. Wybór metody	52
7. Eksperyment I – losowanie dowolnych wartości L_{AE}.....	54
7.1. Charakterystyka eksperymentu.....	54
7.2. Wyniki eksperymentu	56
8. Kategoryzacja operacji lotniczych.....	61

8.1.	Kategoryzacja ze względu na rodzaj operacji lotniczej.....	62
8.2.	Kategoryzacja ze względu na typ silnika.....	64
9.	Eksperyment II – losowanie wartości L_{AE} z podziałem na kategorie wydarzeń akustycznych.....	71
9.1.	Charakterystyka eksperymentu.....	71
9.2.	Wyniki eksperymentu.....	72
10.	Analiza czynnikowa zbioru wartości L_{AE}.....	78
11.	Eksperyment III – losowanie wartości L_{AE} z uwzględnieniem podziału na kategorie oraz dat pomiarów	82
11.1.	Charakterystyka eksperymentu.....	82
11.2.	Wyniki eksperymentu.....	83
12.	Niepewność długoterminowego wskaźnika oceny hałasu.....	88
13.	Weryfikacja metody estymacji wskaźników długookresowych L_{DWN} i L_N.....	91
13.1.	Opis metody estymacji	91
13.2.	Weryfikacja metody.....	92
14.	Podsumowanie i wnioski.....	95

Symbole i oznaczenia

E_A	ekspozycja hałasu
\bar{E}_A	średnia ekspozycja hałasu
$E_A^{(j)}$	ekspozycja hałasu j -tego wydarzenia akustycznego
$E_{A,D}^{(i,j)}$	ekspozycja hałasu j -tego wydarzenia akustycznego w porze dziennej w i -tej dobie w roku
L_{AE}	ekspozycyjny poziom hałasu
$\bar{L}_{AE}^{(k)}$	średni ekspozycyjny poziom hałasu wydarzeń akustycznych k -tej kategorii
$\bar{L}_{AE,D}^{(i)}$	średni ekspozycyjny poziom hałasu w porze dziennej w i -tej dobie w roku
$L_{AE,D}^{(j)}$	ekspozycyjny poziom hałasu j -tego wydarzenia akustycznego w porze dziennej
$\tilde{L}_{AE,D}$	średni ekspozycyjny poziom hałasu w porze dziennej w ciągu całego roku
$\hat{L}_{AE,D}$	średni przybliżony ekspozycyjny poziom hałasu w porze dziennej
$\tilde{L}_{AE,N}$	średni ekspozycyjny poziom hałasu w porze nocnej w ciągu całego roku
$\hat{L}_{AE,N}$	średni przybliżony ekspozycyjny poziom hałasu w porze nocnej
$\tilde{L}_{AE,W}$	średni ekspozycyjny poziom hałasu w porze wieczornej w ciągu całego roku
$\hat{L}_{AE,W}$	średni przybliżony ekspozycyjny poziom hałasu w porze wieczornej
$L_{Aeq,D}^{(i)}$	równoważny poziom dźwięku A w porze dziennej w i -tej dobie w roku
$L_{Aeq,N}^{(i)}$	równoważny poziom dźwięku A w porze nocnej w i -tej dobie w roku
$L_{Aeq,W}^{(i)}$	równoważny poziom dźwięku A w porze wieczornej w i -tej dobie w roku
$L_{Aeq,T}$	równoważny poziom dźwięku A
L_{DWN}	średnioroczny wskaźnik dzieńno-wieczorno-nocny
\hat{L}_{DWN}	przybliżony średnioroczny wskaźnik dzieńno-wieczorno-nocny
$\hat{L}_{DWN}^{(i)}$	przybliżony średnioroczny wskaźnik dzieńno-wieczorno-nocny uzyskany w i -tym losowaniu
\bar{L}_{DWN}	moment centralny pierwszego rzędu wartości wskaźników $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$

$L_{DWN}^{(d)}$	dolna granica określająca przedział występowania estymowanych wartości $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$ z określonym prawdopodobieństwem $p = 0.95$
$L_{DWN}^{(g)}$	górną granicę określającą przedział występowania estymowanych wartości $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$ z określonym prawdopodobieństwem $p = 0.95$
L_D	długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich pór dnia całego roku
\hat{L}_D	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony dla pory dnia
$\hat{L}_D^{(k)}$	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A w porze dziennej dla wydarzeń akustycznych k -tej kategorii
L_N	długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy całego roku
\hat{L}_N	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony dla pory nocy
$\hat{L}_N^{(i)}$	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony dla pory nocy uzyskany w i -tym losowaniu
\bar{L}_N	moment centralny pierwszego rzędu wartości wskaźników $\hat{L}_N^{(i)}$
$\hat{L}_N^{(k)}$	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A w porze nocnej dla wydarzeń akustycznych k -tej kategorii
$L_N^{(d)}$	dolna granica określająca przedział występowania estymowanych wartości $\hat{L}_N^{(i)}$ z określonym prawdopodobieństwem $p = 0.95$
$L_N^{(g)}$	górną granicę określającą przedział występowania estymowanych wartości $\hat{L}_N^{(i)}$ z określonym prawdopodobieństwem $p = 0.95$
L_p	poziom ciśnienia akustycznego
L_{pA}	poziom dźwięku A
L_W	długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich pór wieczoru całego roku
\hat{L}_W	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony dla pory wieczoru
$\hat{L}_W^{(k)}$	przybliżony długookresowy średni poziom dźwięku A w porze wieczornej dla wydarzeń akustycznych k -tej kategorii
$N_D^{(i)}$	liczba operacji lotniczych w porze dziennej w i -tej dobie w roku
N_D	liczba operacji lotniczych występujących w porze dziennej w ciągu całego roku
n_D	liczba wydarzeń akustycznych występujących w porze dziennej dużo mniejsza od liczby wydarzeń akustycznych w ciągu całego roku
$n^{(k)}$	liczba wydarzeń akustycznych k -tej kategorii dużo mniejsza od liczby wydarzeń akustycznych w ciągu całego roku

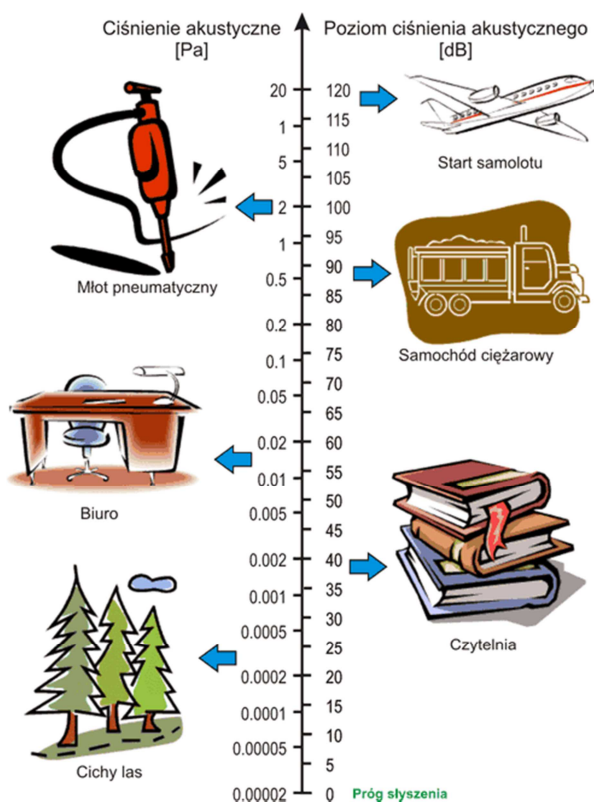
\tilde{N}_D	średnia liczba operacji lotniczych występujących w porze dziennej w ciągu całego roku
$\tilde{N}_D^{(k)}$	średnia liczba operacji lotniczych k -tej kategorii występujących w porze dziennej w ciągu całego roku
\tilde{N}_N	średnia liczba operacji lotniczych występujących w porze nocnej w ciągu całego roku
$\tilde{N}_N^{(k)}$	średnia liczba operacji lotniczych k -tej kategorii występujących w porze nocnej w ciągu całego roku
\tilde{N}_w	średnia liczba operacji lotniczych występujących w porze wieczornej w ciągu całego roku
\tilde{N}_w	średnia liczba operacji lotniczych występujących w porze wieczornej w ciągu całego roku
$\tilde{N}_w^{(k)}$	średnia liczba operacji lotniczych k -tej kategorii występujących w porze wieczornej w ciągu całego roku
$\langle p^2 \rangle$	uśredniony w czasie kwadrat ciśnienia akustycznego
p_0	ciśnienie akustyczne odniesienia, $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

1. Wstęp

1.1. Przedmiot badań

Rozwój cywilizacji spowodował pojawianie się wielu różnych źródeł hałasu. Początkowo były to narzędzia ręczne, później maszyny parowe, a jeszcze później kolej oraz samochody. Wiele współczesnych źródeł hałasu związanych jest z przemieszczaniem się ludzi. Kiedy na początku XX wieku bracia Wright odbywali swoje pierwsze przeloty trwające kilkadziesiąt sekund, nikt nie spodziewał się, że w wieku XXI samolot zdominuje komunikację na znaczne odległości.

Współczesne samoloty, wyposażone w silniki turbośmigłowe, turbowentylatorowe lub odrzutowe, mają możliwość przewożenia setek pasażerów na znaczne odległości. Wiąże się to jednak z dużo większą, niż w przypadku pierwszej maszyny braci Wright emisją hałasu do otoczenia. Zakres zmian ciśnienia akustycznego, które powoduje wrażenie dźwiękowe przedstawiono na rys.1.1.



Rys.1.1. Ciśnienia akustyczne i odpowiadające im poziomy ciśnienia akustycznego różnych dźwięków (źródło: www.ciop.pl)

Ilustracja ta pokazuje źródła dźwięku uszeregowane od najcichszego do najgłośniejszego. Przy najwyższych poziomach hałasu narysowano sylwetkę samolotu. Z powodu dużej emisji hałasu przez większość statków powietrznych oraz ciągły wzrost liczby połączeń lotniczych [1] problem hałasu lotniczego jest społecznie znaczący. Dyrektywa Unii Europejskiej 2002/49/WE [2] wymaga, aby dla hałasu lotniczego tworzyć mapy akustyczne w oparciu o wskaźniki średnioroczne L_{DWN} oraz L_N . Mapy te wykreślane są w oparciu o obliczenia, w których zakłada się szereg parametrów wejściowych, takich jak liczba operacji lotniczych, rodzaje statków powietrznych czy też procentowy rozkład kierunków operowania. Weryfikacja tych obliczeń, jak również wykonanie kalibracji modelu obliczeniowego jest możliwe poprzez porównanie z pomiarami.

Chcąc zweryfikować pomiarowo mapę akustyczną, należałoby wykonywać całoroczne pomiary. Z praktycznego punktu widzenia jest to nieekonomiczne i zbyt czasochłonne. Istnieje zatem potrzeba pomiarowej weryfikacji map akustycznych, bazującej na krótkich, okresowych i relatywnie tanich pomiarach. W oparciu o wskaźniki L_{DWN} oraz L_N wykonuje się również mapy innych źródeł hałasu np. hałasu drogowego. W przypadku tego typu hałasu wykazano, że miesięczny, a nawet tygodniowy pomiar równoważnego poziomu dźwięku, dobrze przybliża wartości wskaźników średniorocznych [3]. Jedna z publikacji, stworzona w ramach dużego europejskiego projektu, związana z estymacją wskaźników długookresowych w oparciu o krótkotrwałe pomiary, podaje tylko ogólne wytyczne, jak należy wykonywać pomiary, aby wartość estymowana była wiarygodna [4]. Brakuje w niej konkretnych wytycznych dotyczących czasu trwania pomiarów czy liczby sesji pomiarowych. Nie ma tam też informacji, która mówiłaby jak liczny powinien być zbiór wartości mierzonych w krótkim okresie czasu aby estymowana na jego podstawie wartość średnioroczna była równa z rzeczywistością. Problem ten dotyczy wszystkich rodzajów hałasu tj. drogowego, kolejowego, przemysłowego oraz lotniczego. Niniejsza praca dotyczyć będzie hałasu lotniczego. W pracy postanowiono skupić się na wskazaniu wytycznych, dotyczących tego rodzaju hałasu, a brakujących w opracowaniu [4]. Wytyczne te posłużą do tego aby stworzyć metodę estymacji wskaźników długookresowych hałasu lotniczego w oparciu o wskaźniki krótkookresowe. Na tej podstawie sformułowano tezę niniejszej pracy doktorskiej.

1.2. Teza, zakres i cele pracy

Teza pracy brzmi następująco:

Wyniki monitoringu hałasu lotniczego, określone wskaźnikiem krótkookresowym L_{AE} , mogą posłużyć do weryfikacji wskaźników długookresowych L_{DWN} i L_N oraz do weryfikacji dokumentów na nich opartych np. map akustycznych.

Chcąc udowodnić powyższą tezę należy zrealizować dwa cele. Pierwszym z nich jest określenie liczebności oraz zawartości zbioru wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu, L_{AE} , potrzebnych do wyznaczenia wskaźników długookresowych, przy ustalonej maksymalnej różnicy względem wartości rzeczywistej. W pracy zakłada się, że estymowana wartość wskaźników długookresowych L_{DWN} i L_N nie powinna różnić się od tej prawdziwej o więcej niż 1.5 dB. Założenie to wynika z tego, że metody obliczeniowe stosowane m. in. do określania wskaźników długookresowych obarczone są niepewnością rzędu 1.5 – 3 dB [5]-[7]. Drugim celem pracy jest pokazanie jak wykonywać krótkotrwały monitoring hałasu lotniczego, aby jego wyniki były użyteczne do określania wskaźników długookresowych. Należy wskazać jak długo powinien trwać monitoring okresowy. Ważnym jest również określenie liczby sesji pomiarowych oraz interwałów czasowych pomiędzy nimi. Ustalenie tych parametrów, w połączeniu z wynikami realizacji pierwszego celu pracy, prawdopodobnie pozwoli na określenie wartości długookresowych L_{DWN} i L_N zgodnie z przyjętym założeniem.

Ponieważ opracowywana metoda estymacji wskaźników długookresowych bazować będzie na skończonej próbie, niezbędne jest obliczanie niepewności estymowanej wartości. Za ostatni cel postawiono sobie zatem opracowanie metody obliczania niepewności wskaźników długookresowych, wyznaczonych w oparciu o wskaźniki krótkookresowe.

Rozprawa doktorska składa się z 14 rozdziałów oraz spisu literatury. Pierwszy rozdział zawiera ogólne informacje na temat genezy oraz celów pracy. Przedstawiona została w nim również teza pracy. Rozdział drugi zawiera definicje, używanych w trakcie rozważań, wskaźników oceny hałasu. Następnie przedstawiono matematyczne wyprowadzenie zależności pomiędzy wskaźnikiem krótkookresowym L_{AE} , a wartościami długookresowymi L_{DWN} i L_N (rozdział 3). Pokazuje ono m. in. czego będą dotyczyły badania i analizy przedstawione w niniejszej pracy. Kolejny rozdział to analiza obecnego stanu wiedzy podzielona na cztery części. Pierwsza z nich to przegląd używanych w

świecie wskaźników oceny hałasu lotniczego (rozdział 4.1). W części drugiej opisano przeprowadzone dotychczas próby estymacji wskaźników długookresowych hałasu lotniczego jednak innych niż L_{DWN} i L_N . W części tej omówiono także kilka prac, które dotyczą estymacji wartości L_{DWN} i L_N , jednak stosowanych do hałasów innych niż lotniczy (rozdział 4.2). Rozdział 4.3 przedstawia wyniki badań związanych z analizą kształtów rozkładów wskaźników oceny hałasu. Ostatnia część rozdziału 4 przedstawia sposób obliczania niepewności równoważnego poziomu dźwięku, obliczanego na podstawie wartości danych wskaźnikami krótkookresowymi L_{AE} .

Cztery pierwsze rozdziały pracy stanowią część teoretyczną, kolejne siedem rozdziałów to część eksperymentalna. W rozdziale 5 omówiono zbiór danych oraz system monitoringu hałasu, przy pomocy którego zostały one zebrane. W rozdziale tym przedstawiono też wartości wskaźników L_{DWN} i L_N określone na podstawie całorocznych pomiarów w wybranych punktach pomiarowych. W kolejnej części pracy (rozdział 6) omówiono metody oceny estymacji wskaźników długookresowych, które wykorzystywano w eksperymentach opisanych w rozdziałach 7, 9 i 11. Pierwszy z eksperymentów omówiony w rozdziale 7 dotyczy ustalenia mocy zbioru wartości L_{AE} dającej wyniki estymacji zgodne z postawionym założeniem (różnica nie większa niż 1.5 dB). Eksperyment II, omówiony w rozdziale 9 również ma na celu określenie mocy zbioru wartości L_{AE} , jednak uwzględnia on podział danych na klasy, które powinny zminimalizować poszukiwaną liczebność zbioru. Sam podział na klasy wypracowano poprzez szczegółową analizę statystyczną danych, a opisano to w rozdziale 8. Ostatnie dwa rozdziały (10 i 11) części eksperymentalnej, skupiają się na dalszej minimalizacji mocy zbioru danych potrzebnych, do spełniającej założenie, estymacji wartości L_{DWN} i L_N . W rozdziale 10 przeanalizowano zmienność wartości wskaźnika L_{AE} w ciągu roku. Ze względu na zróżnicowanie poziomów ekspozycyjnych w różnych miesiącach, stwierdzono że aby zminimalizować poszukiwaną moc zbioru, trzeba wykonywać pomiary kilkakrotnie, w pewnych odstępach czasu. Wyniki eksperymentu III-go opisanego w rozdziale 11, odpowiadają jak często i jak długo należy wykonywać monitoring okresowy aby estymowana wartość L_{DWN} i L_N była zgodna z założeniami, wykorzystując przy tym małą liczbę wartości L_{AE} . Po części eksperymentalnej pracy przedstawiono metodę obliczania niepewności wskaźników L_{DWN} i L_N , uwzględniającą podział danych na kategorie wydarzeń akustycznych (rozdział 12). W rozdziale 13 przedstawiono wartości estymowanych wskaźników L_{DWN} i L_N zgodnie z wypracowaną metodyką. Wyniki te porównano z wartościami rzeczywistymi obliczonymi, a przedstawionymi wcześniej w

rozdziale 5. Ostatni rozdział 14 to podsumowanie pracy przedstawiający jej najważniejsze wyniki oraz wnioski.

2. Podstawowe wzory i definicje

Wskaźniki hałasu zostały zdefiniowane po to, aby w sposób obiektywny oceniać dokuczliwość hałasu. W zależności od rodzaju hałasu stosuje się ich różne rodzaje. Zadaniem każdego z nich jest odzwierciedlanie odczucia, jakie doświadcza człowiek narażony na dany rodzaj hałasu. Niniejsza praca dotyczy wskaźników krótko- oraz długookresowych w kontekście oceny hałasu lotniczego. Punktem wyjścia wielu wskaźników oceny hałasu jest poziom ciśnienia akustycznego oraz poziom dźwięku A.

2.1. Poziom ciśnienia akustycznego i poziom dźwięku A

Podstawowym parametrem pola akustycznego jest poziom ciśnienia akustycznego. Parametr ten wprowadzony został w latach 30 ubiegłego wieku i zdefiniowany jest jako [8],

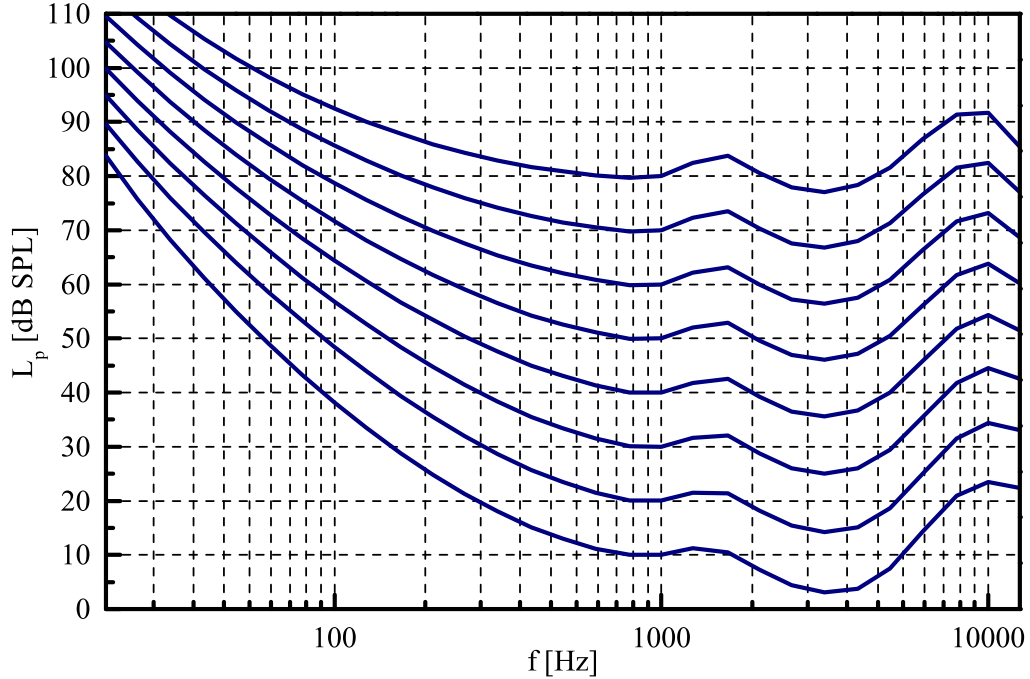
$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{\langle p^2 \rangle}{p_0^2} \right), \quad (2.1)$$

gdzie $\langle p^2 \rangle$ to uśredniony w czasie kwadrat ciśnienia akustycznego,

$$\langle p^2 \rangle = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t p^2(\xi) d\xi, \quad (2.2)$$

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa] oznacza ciśnienie odniesienia. W przypadku oceny hałasu lotniczego czas uśredniania wynosi $\tau = 0.125$ [s], co odpowiada stałej czasowej FAST. Definicja (2.1) wynika bezpośrednio z prawa Webera-Fechnera [9]. Prawo to mówi, że wrażenie słuchowe jest proporcjonalne do logarytmu z natężenia bodźca odniesionego do natężenia bodźca progowego. W przypadku oceny hałasu, miarą bodźca jest natężenie dźwięku, proporcjonalne do średniego kwadratu ciśnienia akustycznego.

Poziom ciśnienia akustycznego nie obejmuje wszystkich parametrów fali akustycznej, które mają wpływ na percepcję głośności. Percepcja głośności hałasu jest zależna od widma częstotliwościowego sygnału [9]. Z analizy przedstawionych na rys. 2.1 krzywych izofonicznych [10] można zauważyć, że głośność tonów o tym samym poziomie ciśnienia akustycznego zależy od częstotliwości [11].



Rys. 2.1. Krzywe izofoniczne (ISO 226:2003)[10]

Uwzględniając wpływ częstotliwości fali na percepcję głośności, wprowadzono wskaźnik zwany poziomem dźwięku. Poziom dźwięku to skorygowany w dziedzinie częstotliwości poziom ciśnienia akustycznego [8]. Korekcja ta wykonywana jest zgodnie ze wzorem

$$L_{pA} = 10 \cdot \log \left(\sum_n 10^{0.1(L_{pn} + K_n)} \right), \quad (2.3)$$

gdzie L_{pn} jest poziomem ciśnienia akustycznego w n -tym paśmie częstotliwości, natomiast K_n to poprawki korekcyjne tworzące tzw. krzywą korekcyjną A (odwrócona krzywa izofoniczna dla poziomu głośności 40 fonów). Definicję poziomu dźwięku A stanowi wzór,

$$L_{pA} = 10 \log \left(\frac{\langle P_A^2 \rangle}{P_0^2} \right). \quad (2.4)$$

Poziom dźwięku dobrze koreluje z subiektywną oceną głośności chwilowej większości rodzajów hałasu [12].

2.2. Ekspozycyjny poziom hałasu – wskaźnik krótkoterminowy

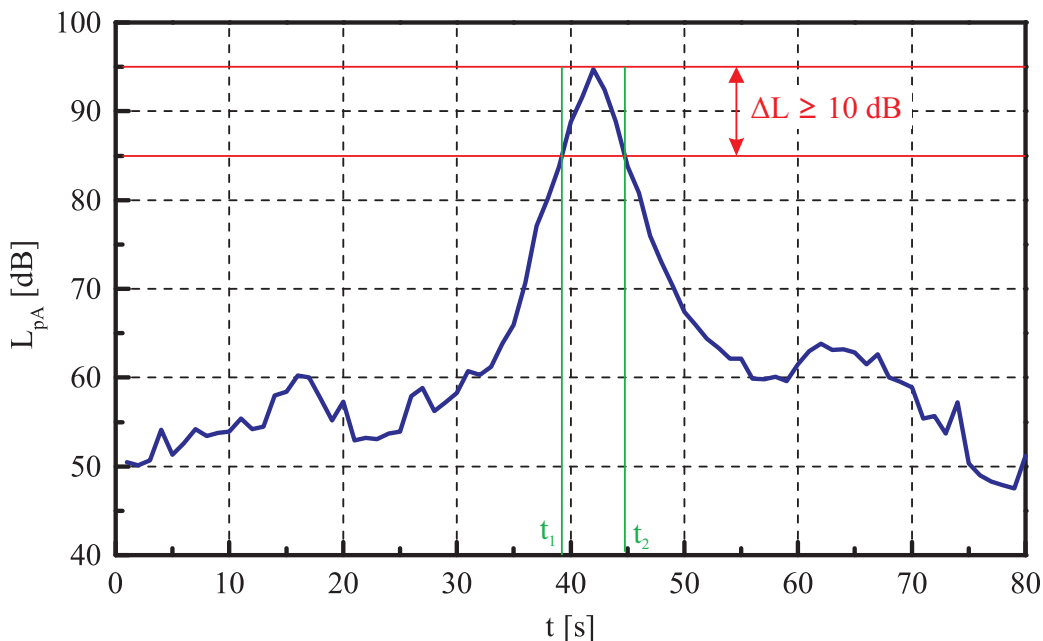
Do oceny hałasu pojedynczych wydarzeń akustycznych [9], a tymi są m. in. operacje lotnicze, stosuje się ekspozycyjny poziom hałasu. Wskaźnik ten określa całkowitą energię akustyczną jaką źródło emituje do otoczenia. Ekspozycja hałasu zdefiniowana została następująco[13],

$$E_A = \int_{-t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt . \quad (2.5)$$

Określa ona energię, jaka oddana została do otoczenia w przedziale czasu od t_1 do t_2 . Logarytmiczną miarą ekspozycji hałasu jest ekspozycyjny poziom hałasu dany wzorem [9],

$$L_{AE} = 10 \log \left(\frac{E_A}{p_0^2 \cdot t_0} \right), \quad (2.6)$$

gdzie $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa] to ciśnienie odniesienia, a $t_0 = 1$ [s] to czas odniesienia, który uniezależnia wartość L_{AE} od czasu. Zgodnie ze wzorami (2.5) oraz (2.6) ekspozycyjny poziom hałasu opisuje zmiany poziomu dźwięku w trakcie wydarzenia akustycznego. W celu określenia granic całkowania we wzorze (2.5) stosuje się różne kryteria ich wyboru. Najczęściej przyjmowane kryterium zostało przedstawione na rys.2.2.



Rys.2.2. Określanie granic całkowania dla pojedynczych wydarzeń akustycznych

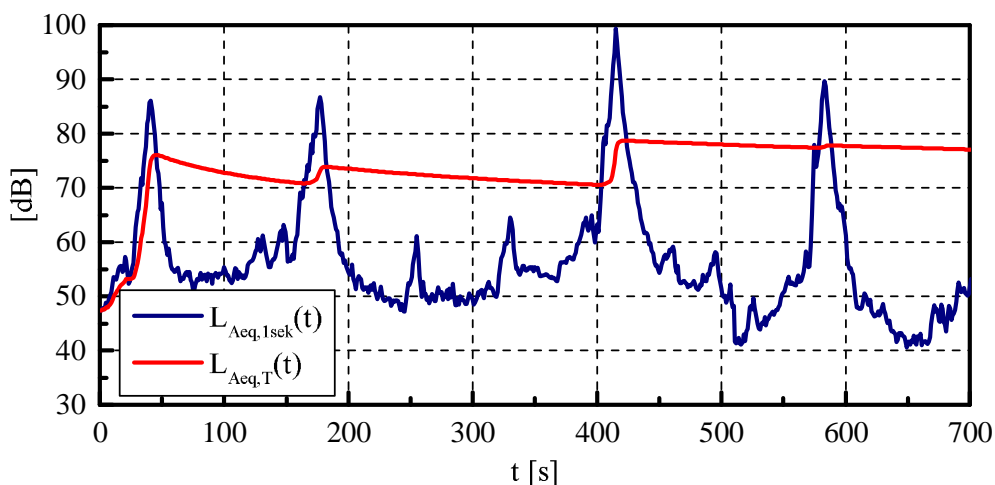
Kryterium to jest rekomendowane dla oceny hałasu pojedynczych wydarzeń akustycznych takich jak starty, lądowania i przeloty samolotów [14]. Zdefiniowane w ten sposób granice całkowania gwarantują, że energia wydarzenia akustycznego obliczonego w przedziale czasu od t_1 do t_2 będzie porównywalna z całkowitą energią wydarzenia akustycznego. Wynika to z tego, że poziomy o 10 dB mniejsze od maksymalnej wartości sygnału, w przypadku wydarzeń takich jak starty czy lądowania statków powietrznych, ale również innych, mają znikomy wpływ na ostateczną wartość ekspozycyjnego poziomu hałasu.

2.3. Równoważny poziom dźwięku

Ekspozycyjny poziom hałasu pozwala oceniać hałas pochodzący od pojedynczych wydarzeń akustycznych. Aby oceniać oddziaływanie hałasu na człowieka w okresie dłuższym niż kilkanaście sekund, korzysta się z równoważnego poziomu dźwięku A. Równoważny poziom dźwięku A to logarytmowane, średnie wartości energii akustycznej w czasie oceny, T . Definicja równoważnego poziomu dźwięku jest następująca:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right). \quad (2.7)$$

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska czasy oceny dla hałasu lotniczego w Polsce wynoszą $T = 16$ h (6:00 – 22:00) dla pory dziennej oraz $T = 8$ h (22:00 – 6:00) dla pory nocnej [15]. Wartość równoważnego poziomu dźwięku można zmierzyć bezpośrednio korzystając z miernika poziomu dźwięku A. Na rys.2.3 przedstawiono zmiany chwilowych wartości równoważnego poziomu dźwięku A oraz równoważnego poziomu dźwięku A, od początku pomiaru do chwili bieżącej.



Rys.2.3. Zmiany równoważnego poziomu dźwięku A, $L_{Aeq,T}$ dla $T = 700$ [s]

Istnieje zależność, na podstawie której można obliczać wartości równoważnego poziomu dźwięku, mając do dyspozycji zmierzone wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. Jeżeli do równości,

$$\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt = \int_0^{t_1} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt + \int_{t_2}^{t_3} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt + \dots + \int_{t_{N-1}}^{t_N=T} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt, \quad (2.8)$$

zastosuje się definicję (2.5) oraz (2.7) to w efekcie otrzymuje się równoważny poziom dźwięku w postaci,

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T \cdot p_0^2} \sum_{j=1}^N E_A^{(j)} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{N}{T \cdot p_0^2} \cdot \bar{E}_A \right), \quad (2.9)$$

przy czym średnią wartość ekspozycji hałasu oblicza się ze wzoru,

$$\bar{E}_A = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_A^{(j)}. \quad (2.10)$$

Ostatecznie, z zależności (2.6) oraz (2.9) otrzymujemy, że

$$L_{Aeq,T} = \bar{L}_{AE} + 10 \cdot \log \left(\frac{N \cdot t_0}{T} \right), \quad t_0 = 1s \quad (2.11)$$

gdzie \bar{L}_{AE} jest średnim poziomem ekspozycyjnym ze wszystkich wydarzeń akustycznych występujących w czasie oceny T . Wzór (2.11) ma swoje uogólnienie, przy uwzględnieniu wielu kategorii wydarzeń akustycznych [13],

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left(\frac{t_0}{T} \sum_{k=1}^K N_k \cdot 10^{0.1 \cdot \bar{L}_{AE}^{(k)}} \right) \quad (2.12)$$

gdzie K oznacza liczbę kategorii akustycznych, N_k jest liczbą wydarzeń akustycznych k -tej kategorii, zaś $\bar{L}_{AE}^{(k)}$ wyraża średni ekspozycyjny poziom hałasu k -tej kategorii.

2.4. Długookresowy poziom dźwięku L_{DWN} i L_N

Czas oceny T równoważnego poziomu dźwięku może być różny. W większości przypadków nie przekracza on jednej doby. W 2002 roku dyrektywa Unii Europejskiej 2002/49/WE [2] wprowadziła jako obowiązujące wskaźniki hałasu bazujące na poziomie równoważnym których czasy oceny wynoszą cały rok. Wskaźniki te to L_{DWN} , L_D , L_W , L_N a zdefiniowane zostały one w latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Dwa z nich w są obowiązującymi w Polsce wskaźnikami oceny hałasu w środowisku [16]. Pierwszy z nich to średnioroczny wskaźnik dzienno-wieczorno-nocy L_{DWN} , zdefiniowany następującą zależnością:

$$L_{DWN} = 10 \cdot \log \left(\frac{12}{24} \cdot 10^{0.1 \cdot L_D} + \frac{4}{24} \cdot 10^{0.1 \cdot (L_W + 5)} + \frac{8}{24} \cdot 10^{0.1 \cdot (L_N + 10)} \right). \quad (2.13)$$

Wielkości L_D , L_W i L_N występujące w zależności (2.13) oznaczają odpowiednio:

- L_D – długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich pór dnia całego roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 6:00 do godz. 18:00),

$$L_D = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} 10^{0.1 \cdot L_{Aeq,D}^{(i)}} \right), \quad (2.14)$$

- L_W – długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich pór wieczoru całego roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 18:00 do godz. 22:00),

$$L_W = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} 10^{0.1 \cdot L_{Aeq,W}^{(i)}} \right), \quad (2.15)$$

- L_N – długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy całego roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 22:00 do godz. 6:00),

$$L_N = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} 10^{0.1 \cdot L_{Aeq,N}^{(i)}} \right). \quad (2.16)$$

Wskaźnik zdefiniowany wzorem (2.16) jest drugim długo-okresowym wskaźnikiem oceny stanu środowiska akustycznego stosowanym w Polsce.

3. Związek między wskaźnikami długookresowymi a krótkookresowym

Teza niniejszej pracy stanowi, że możliwe jest estymowanie wskaźników długookresowych, L_{DWN} oraz L_N , poprzez wykonywanie krótkotrwałych pomiarów hałasu, których wyniki dane są zbiorem wartości L_{AE} . Chcąc dokonać tej estymacji należy znać relację między wartościami L_{DWN} oraz L_N , a L_{AE} . Podstawiając do wzoru (2.11) czas oceny $T = T_D = 12$ h otrzymujemy następujące równanie,

$$L_{Aeq,D}^{(i)} = \bar{L}_{AE,D}^{(i)} + 10 \cdot \log\left(\frac{N_D^{(i)} \cdot t_0}{T_D}\right), \quad (3.1)$$

gdzie $N_D^{(i)}$ jest liczbą wydarzeń akustycznych w czasie T_D , natomiast $\bar{L}_{AE,D}^{(i)}$ średnim ekspozycyjnym poziomem hałasu. Równanie to określa równoważny poziom dźwięku dla pory dziennej i -tej doby w roku. Przez analogię, podobne równania można zapisać dla pory wieczornej oraz pory nocnej. Łącząc ze sobą formuły (2.14) oraz (3.1) otrzymujemy długookresowy średni poziom dźwięku dla wszystkich pór dnia całego roku,

$$L_D = 10 \cdot \log\left(\frac{t_0}{365 \cdot T_D \cdot E_0} \sum_{i=1}^{365} \bar{E}_{A,D}^{(i)} \cdot N_D^{(i)}\right). \quad (3.2)$$

Kombinacja wzorów (2.10) oraz (3.2) prowadzi do wyrażenia,

$$L_D = 10 \cdot \log\left(\frac{t_0}{365 \cdot T_D \cdot E_0} \sum_{i=1}^{365} N_D^{(i)} \left[\frac{1}{N_D^{(i)}} \sum_{j=1}^{N_D^{(i)}} E_{A,D}^{(i,j)} \right]\right). \quad (3.3)$$

gdzie indeks „ j ” oznacza j -te wydarzenie akustyczne. Po pewnych przekształceniach otrzymujemy równanie,

$$L_D = 10 \cdot \log\left(\frac{t_0}{365 \cdot T_D \cdot E_0} \frac{N_D}{N_D} \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{N_D^{(i)}} E_{A,D}^{(i,j)}\right), \quad (3.4)$$

gdzie N_D to liczba wszystkich wydarzeń akustycznych w ciągu roku w porze dziennej,

$$N_D = \sum_{i=1}^{365} N_D^{(i)}. \quad (3.5)$$

Ostatecznie, otrzymujemy średnioroczny poziom dźwięku A w porze dziennej, który zależy od średniorocznego ekspozycyjnego poziomu hałasu $\tilde{L}_{AE,D}$ oraz średniej dziennej liczby operacji w ciągu roku, $\tilde{N}_D = N_D / 365$,

$$L_D = \tilde{L}_{AE,D} + 10 \cdot \log\left(\frac{\tilde{N}_D \cdot t_0}{T_D}\right). \quad (3.6)$$

Przez analogię można wyprowadzić taką samą zależność dla pory wieczornej oraz nocnej, a następnie podstawić wskaźniki L_D, L_W, L_N do równania (2.13). Obliczenie rzeczywistych wartości L_{DWN} oraz L_N na podstawie kombinacji wzorów (2.13). oraz (3.6) wymaga średnich wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu $\tilde{L}_{AE,D}$, $\tilde{L}_{AE,W}$ oraz $\tilde{L}_{AE,N}$. Aby określić dokładne wartości $\tilde{L}_{AE,D}$, $\tilde{L}_{AE,W}$ oraz $\tilde{L}_{AE,N}$ trzeba by prowadzić pomiary przez wszystkie 365 dni, wieczory i noce całego roku. Z technicznego punktu widzenia jest to możliwe, jednak zbyt kosztochłonne – szczególnie w przypadku, gdy hałas należy ocenić w wielu punktach zlokalizowanych wokół lotniska. Jednym z celów tej pracy jest minimalizacja mocy zbioru wartości L_{AE} , przy jednoczesnym spełnieniu założenia postawionego na początku pracy. Założenie to stanowi aby estymowana wartość nie różniła się od wartości rzeczywistej, dla potrzeby pracy zwanej również prawdziwą, o więcej niż 1.5 dB. Wprowadźmy zatem przybliżenie, które będzie podstawą do analiz wykonywanych w niniejszej pracy. Wartość dokładną,

$$\tilde{L}_{AE,D} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{N_D} \sum_{j=1}^{N_D} 10^{0.1 \cdot L_{AE,D}^{(j)}}\right), \quad (3.7)$$

zastąpmy wartością przybliżoną,

$$\hat{L}_{AE,D} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{n_D} \sum_{j=1}^{n_D} 10^{0.1 \cdot L_{AE,D}^{(j)}}\right), \quad (3.8)$$

przy czym $n_D \ll N_D$. Przybliżenie (3.8) ogranicza liczbę pomiarów wydarzeń akustycznych, na podstawie których określamy średni ekspozycyjny poziom hałasu. Konsekwentnie otrzymujemy przybliżenie długookresowego średniego poziomu dźwięku wzór (2.14), $L_D \approx \hat{L}_D$ przy czym,

$$\hat{L}_D = \hat{L}_{AE,D} + 10 \cdot \log\left(\frac{\tilde{N}_D \cdot t_0}{T_D}\right). \quad (3.9)$$

Podobnie relacje otrzymujemy dla pory wieczornej oraz nocnej. Drugim czynnikiem wpływającym na wartość poziomów L_{DWN} oraz L_N jest średnioroczna liczba operacji \tilde{N}_D , \tilde{N}_W , \tilde{N}_N . Ze względu na specyfikę źródła hałasu (planowanie siatki połączeń z dużym wyprzedzeniem, nawet na cały rok z góry) założymy, że liczby \tilde{N}_D , \tilde{N}_W oraz \tilde{N}_N są znane a priori.

Stosując przybliżenie (3.9) należy postawić pytanie: Jak liczne powinny być zbiory $L_{AE,D}$, $L_{AE,W}$, $L_{AE,N}$ oraz z jakich wartości powinny się składać, aby przybliżenia,

$$L_{DWN} \approx \hat{L}_{DWN}, \quad L_N \approx \hat{L}_N, \quad (3.10)$$

były spełnione? Każdy wynik, dany wskaźnikiem oceny hałasu obarczony jest niepewnością, którą należy podać wraz z nim. W przypadku gdy mamy do czynienia z przybliżeniem, wartości niepewności są tym bardziej ważne. Wskazane jest zatem opracowanie metody obliczania niepewności dla estymowanych długookresowych wskaźników oceny hałasu L_{DWN} oraz L_N . W kolejnych rozdziałach pracy omówiono postawione powyżej problemy tj. określono moc oraz elementy zbioru wartości L_{AE} dające wynik średnioroczny zbliżony do wartości prawdziwej, jak również pokazano metodę obliczania niepewności L_{DWN} oraz L_N .

4. Aktualny stan wiedzy

Analiza obecnego stanu wiedzy dotyczyć będzie kilku aspektów związanych z krótko- i długookresowymi wskaźnikami oceny hałasu. Poruszone zostaną następujące zagadnienia:

- stosowane na świecie wskaźniki oceny hałasu lotniczego,
- estymacja wskaźników długookresowych poprzez wykonywanie pomiarów krótkotrwałych,
- rozkłady statystyczne wskaźników oceny hałasu,
- metoda określania niepewności złożonej.

Zagadnienia te są istotne dla pracy z różnych względów. Przegląd stosowanych wskaźników oceny hałasu lotniczego pokaże, czy zagadnienie estymacji wartości L_{DWN} oraz L_N w oparciu o L_{AE} może dotyczyć krajów innych niż Polska. Informacje na temat estymacji wskaźników długookresowych poprzez wykonanie pomiarów krótkotrwałych pokażą jak dotychczas rozwiązywano to zagadnienie w przypadku hałasu lotniczego, ale również innych rodzajów hałasu. Pozwolą one także wyciągnąć wnioski związane z dotychczasowymi próbami, które pomogą w przygotowaniu metody przedstawianej w niniejszej pracy. Bez wątplenia na wynik estymacji wskaźników długookresowych będzie miał wpływ kształt rozkładu statystycznego wartości krótkookresowych. Aby przekonać się, co może ten kształt determinować, przeanalizowano literaturę również pod tym kątem. Ostatni aspekt poruszony w przeglądzie literatury, dotyczyć będzie metody określania niepewności złożonej. Tego typu metodę obliczania niepewności należy zaproponować dla wskaźników estymowanych w niniejszej dysertacji.

4.1. Wskaźniki oceny hałasu lotniczego

Obligatoryjnymi, do oceny strategicznej, wskaźnikami oceny hałasu w środowisku (w tym również hałasu lotniczego) w Unii Europejskiej są wskaźniki L_{DWN} oraz L_N [2]. Wskaźniki te służą do długookresowej oceny hałasu m. in. jego dokuczliwości oraz wpływu na komfort snu. Zarówno L_{DWN} , jak i L_N , stosuje się do prognozowania hałasu. Odbywa się ono poprzez wykonywanie obliczeń przy pomocy programów

komputerowych. Wyniki obliczeń prezentuje się np. w postaci mapy akustycznej, która pokazuje w jaki sposób dane źródło hałasu oddziałuje na otoczenie. W przypadku hałasu lotniczego programem stosowanym do obliczeń jest między innymi INM 7.0¹, w którym zaimplementowano metodę ECAC.CEAC Doc. 29 [17]. Metoda ta jest rekomendowaną przez dyrektywę Parlamentu Europejskiego 2002/49/WE [2].

Wskaźniki L_{DWN} oraz L_N najczęściej określane są przez obliczenia. Spowodowane jest to tym, że zgodnie z definicjami (2.13) - (2.16) obejmują one okres całego roku. Mierzenie ich jest czasochłonne i niepraktyczne. Bardzo rzadko wykonuje się pomiary całoroczne wartości L_{DWN} oraz L_N . Tylko w przypadku monitoringu ciągłego jest to możliwe, a ten wykonuje się zazwyczaj w kilku punktach pomiarowych, co jest niewystarczające. Bieżącą ocenę pomiarową stanu środowiska akustycznego wokół lotnisk przeprowadza się w oparciu o inne wskaźniki oceny hałasu. Niestety w ich przypadku nie ma wytycznych, które ujednoliciłyby je we wszystkich krajach Unii Europejskiej. W dokumencie [18], przygotowanym przez I-ICNE² oraz w opracowaniu ERCD³ [19], zebrano i opisano większość stosowanych wskaźników oceny hałasu lotniczego w Europie jak i innych krajach. Wybrane z nich przedstawiono w tab. 4.1.

Tab. 4.1. Zestawienie wskaźników oceny hałasu lotniczego w niektórych krajach Unii Europejskiej oraz w USA

Kraj	Wskaźniki	Opis
Austria	$L_{DN}^{(24h)}$	*- opis pod tabelą
	L_{Amax}	maksymalny poziom dźwięku A w określonym przedziale czasu
Belgia: Bruksela	L_{AE}	ekspozycyjny poziom hałasu
	$L_{Aeq,sp,aircraft}$	równoważny poziom dźwięku A uwzględniający tonalność wyznaczony dla hałasu lotniczego
Belgia: Wallonia	$L_{DN}^{(24h)}$	*- opis pod tabelą
Dania	$L_{DWN}^{(24h)}$	** - opis pod tabelą
	L_{Amax}	maksymalny poziom dźwięku A w określonym przedziale czasu
Finlandia	$L_{Aeq,T}$	równoważny poziom dźwięku A w czasie oceny T

¹ Integrated Noise Model – jeden z programów komputerowych służący do oceny wpływu hałasu lotniczego na tereny wokół lotnisk.

² I-ICNE – International Institute of Noise Control Engineering

³ ERCD – Environmental Research and Consultancy Department

Kraj	Wskaźniki	Opis
Francja	$L_{DWN}^{(24h)}$	** - opis pod tabelą
Hiszpania	$L_{Aeq,T}$	równoważny poziom dźwięku A w czasie oceny T
Holandia	$L_{DWN}^{(24h)}$	** - opis pod tabelą
	L_N	średni poziom dźwięku A w porze nocnej określonej przez przedział czasowy N
Polska	$L_{Aeq,T}$	równoważny poziom dźwięku A w czasie oceny T
Portugalia	$L_{DWN}^{(24h)}$	** - opis pod tabelą
	L_N	średni poziom dźwięku A w porze nocnej określonej przez przedział czasowy N
Słowenia	$L_{DWN}^{(24h)}$	** - opis pod tabelą
	L_D	średni poziom dźwięku A w porze dziennej określonej przez przedział czasowy D
	L_W	średni poziom dźwięku A w porze wieczornej określonej przez przedział czasowy W
	L_N	średni poziom dźwięku A w porze nocnej określonej przez przedział czasowy N
Szwajcaria	$L_{Aeq,T}$	równoważny poziom dźwięku A w czasie oceny T
Szwecja	$L_{DWN}^{(24h)}$	** - opis pod tabelą
	FBN	odpowiednik wskaźnika L_{DWN} w którym wagi dla pory wieczora i nocy wynoszą odpowiednio 4.78 dB oraz 10 dB
	L_{AFmax}	maksymalny poziom dźwięku A mierzonego ze stałą czasową FAST w określonym przedziale czasu
Turcja	$L_{Aeq,T}$	równoważny poziom dźwięku A w czasie oceny T
Wielka Brytania	L_{Amax}	maksymalny poziom dźwięku A w określonym przedziale czasu
Włochy	L_{VA}	24-godzinny poziom dźwięku z karą 10 dB dla pory nocnej (23:00 – 6:00), wyznaczany dla 21 dni w roku
USA	$L_{DN}^{(24h)}$	* - opis pod tabelą
	L_{AE}	ekspozycyjny poziom hałasu

* Wyznaczany w ciągu jednej doby dziennie-nocny średni poziom dźwięku wyznaczany zgodnie z równaniem: $L_{DN}^{(24h)} = 10 \cdot \log \left(\frac{D}{24} \cdot 10^{0.1 \cdot L_D} + \frac{N}{24} \cdot 10^{0.1 \cdot (L_N + 10)} \right)$, gdzie $D + N = 24$ h. Wartości D i N różnią się w zależności od kraju

** Wyznaczany w ciągu jednej doby dziennie-wieczorno-nocny średni poziom dźwięku wyznaczany zgodnie z równaniem: $L_{DWN}^{(24h)} = 10 \cdot \log \left(\frac{D}{24} \cdot 10^{0.1L_D} + \frac{W}{24} \cdot 10^{0.1L_W} + \frac{N}{24} \cdot 10^{0.1(L_N+10)} \right)$, gdzie $D + W + N = 24$ h. Wartości D , W oraz N różnią się w zależności od kraju.

Tab. 4.1 pokazuje zróżnicowanie sposobów pomiarowej oceny hałasu lotniczego. W Wielkiej Brytanii do jego oceny korzysta się z poziomu maksymalnego, w Słowenii i Portugalii z dobowego wskaźnika $L_{DWN}^{(24h)}$. W krajach takich jak Stany Zjednoczone czy Belgia, korzysta się z ekspozycyjnego poziomu hałasu, L_{AE} . Do niedawna również w Polsce istniały wartości dopuszczalne dla L_{AE} . Mimo że zostały one zlikwidowane, Rozporządzenie Ministra Środowiska [20] określa metodykę wyznaczania równoważnego poziomu dźwięku A w oparciu właśnie o poziomy ekspozycyjne.

Zarówno w Polsce jak i innych krajach, do oceny dobowej korzysta się z równoważnego poziomu dźwięku A. Ze względu na to, że lotniska zlokalizowane są zazwyczaj w pobliżu miast, bardzo trudno jest określać równoważny poziom dźwięku A wyłącznie dla hałasu lotniczego. Wpływ innych źródeł dźwięku powoduje, że bezpośredni pomiar poziomu $L_{Aeq,T}$ hałasu pochodzącego z lotniska nie jest możliwy. Z tego powodu jego ocenę wykonuje się metodą pośrednią. Polega ona na rejestracji zmian poziomu dźwięku w czasie. Następnie korzystając z algorytmów, które opisano m. in. w pracach [21]-[26], identyfikuje się wydarzenia akustyczne odpowiadające operacjom lotniczym i określa się dla nich wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. Na podstawie liczby operacji oraz zmierzonych wartości L_{AE} określa się równoważny poziom dźwięku A dla doby. Metodę tę stosuje się wielu krajach Europy, w których hałas dobowy ocenia się właśnie w oparciu o równoważny poziom dźwięku A, ale także dobowe wskaźniki $L_{DN}^{(24h)}$ czy $L_{DWN}^{(24h)}$ (tab. 4.1) [18]. Przedstawione powyżej rozwiązanie można zastosować również do oceny wskaźników średniorocznych L_{DWN} czy L_N . Pojawia się jednak problem reprezentatywności mierzonych wartości L_{AE} w odniesieniu do całego roku. Ze względu na to, że na podstawie map akustycznych tworzonych w oparciu o L_{DWN} i L_N podejmuje się działania przeciwhałasowe, które często związane są dużymi wydatkami, należałoby je weryfikować pomiarowo. Wcześniej wspomniano, że wykonywanie pomiarów całorocznych jest czasochłonne i nieekonomiczne. Dlatego ważnym jest aby określać w/w wskaźniki długookresowe w oparciu o pomiary krótkotrwałe. Jak dotąd nie opracowano

metody krótkotrwałych pomiarów (rzędu kilku dni), która pozwoliłaby na porównanie wskaźników obliczonych w mapach akustycznych hałasu lotniczego, tj. L_{DWN} oraz L_N , ze wskaźnikami mierzonymi bezpośrednio. Stworzenie takiej metody pozwoli na szybką ocenę rzetelności map akustycznych oraz innych dokumentów opartych o wartości średnioroczne. Metoda ta będzie możliwa do zastosowania w wielu krajach Unii Europejskiej.

4.2. Estymacja wskaźników długookresowych na podstawie pomiarów krótkotrwałych

Zagadnienie estymacji wskaźników hałasu przez krótkotrwałe pomiary, istniało w literaturze zanim pojawiły się wskaźniki długookresowe L_{DWN} oraz L_N . Już w latach 70 XX wieku starano się ograniczyć czas pomiaru do minimum przy zachowaniu zgodności wyniku z wartością mierzoną w pełnym czasie oceny [27]. Oczywiście metody ograniczające czas pomiaru mogą powodować błędy [28].

Zauważyli to również Safeer i inni [29]. W swoich badaniach zajmowali się oni oceną równoważnego poziomu dźwięku w ciągu całej doby, w oparciu o kilkuminutowe próbki poziomu dźwięku pobierane w każdej godzinie danej doby. Swoją uwagę autorzy skupili na jednogodzinnych wartościach równoważnego poziomu dźwięku. Według autorów, znaczący wpływ na wynik ma to, kiedy kilkuminutowa próbka w ciągu godziny została pobrana. Wskazują oni, że tylko w nielicznych przypadkach otrzymywane wyniki dają błąd mniejszy niż ± 2 dB. Pobieranie jednej kilkuminutowej próbki może powodować duże błędy, zwłaszcza gdy histogram wartości poziomu dźwięku ma nieregularny kształt oraz posiada luki dla niektórych z klas. Stosowanie jednej kilkuminutowej próbki poziomu dźwięku ma sens, gdy kształt histogramu wykreślonego dla danego źródła hałasu jest jednomodalny, a wartości skupione są wokół kilku klas. W innych przypadkach autorzy proponują zastosowanie metody polegającej na kilkukrotnym pomiarze kilkunastosekundowych próbek poziomu dźwięku w ciągu godziny. Takie podejście daje dużo mniejszy błąd i pozwala dość dobrze estymować wskaźniki jednogodzinne, a na ich podstawie dobowe.

Podobną tematykę w swojej pracy podjęli Skarlatos i Drakatos. W 1992 roku opracowali oni probabilistyczną metodę oceny równoważnego poziomu dźwięku [30]. W swojej pracy pokazali, jak należy określać minimalny czas pomiaru dający wynik

zgodny z wartością faktycznie zmierzoną, przy założonym błędzie. Do obliczeń wykorzystywali model oparty o funkcję gęstości prawdopodobieństwa poziomego dźwięku. Metoda ta pozwala poprawnie określić poziom długookresowy, gdy znana jest postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa poziomów hałasu. W swojej pracy zauważają, że kształt tej funkcji jest zależny od rodzaju źródła hałasu. Nie bez znaczenia jest też przedział czasu, z jakiego generowano funkcję gęstości prawdopodobieństwa. Przedział ten powinien obejmować możliwie wszystkie kategorie wydarzeń akustycznych podlegających ocenie. Autorzy zauważają, że czas krótkiego pomiaru (dający dobre przybliżenie) jest zależny od pory doby, w których wykonuje się pomiary. Ma to ścisły związek z tym jak zmieniają się parametry źródła w ciągu doby. W tab. 4.2 przedstawiono wyniki pomiarów równoważnego poziomu dźwięku, w zależności od czasów pomiaru uzyskane w pracy [30]. Faktyczna wartość równoważnego poziomu dźwięku wynosiła 72.17 dB, a czas pomiaru był równy 50 min.

Tab. 4.2. Wyniki estymacji wartości równoważnego poziomu dźwięku w zależności od czasu obserwacji

Czas obserwacji [min]	Obliczony L_{AeqT} [dB A]
1	75.3
2	69.2
2	69.9
5	72.12
7	72.15
9	72.12

Jak widać z tab. 4.2 możliwe jest znaczne skrócenie czasu pomiaru, bez znaczącego wpływu na ostateczny wynik. Już przy pomiarze trwającym 5 minut otrzymujemy zgodność rzędu 0.03 dB. Należy pamiętać, że jest to możliwe tylko wtedy, gdy znamy dokładną postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości poziomu dźwięku dla danego źródła hałasu.

Pozycję [31] stanowi ciekawy referat, na temat estymacji długookresowego równoważnego poziomu dźwięku hałasu lotniczego FBN⁴ poprzez pomiary krótkotrwałe. Pokazano tam, jak wykonywać krótkotrwały monitoring hałasu, w oparciu o tygodniowe pomiary równoważnego poziomu dźwięku, który daje wyniki porównywalne ze

⁴ FBN – szwedzki wskaźnik oceny hałasu zbliżony do wskaźnika L_{DWN}

średniorocznymi. W pracy tej uwzględniono dwa czynniki wpływające na prawidłową estymację wartości średniorocznych. Pierwszym z nich były warunki meteorologiczne i związane z nimi zjawiska: refrakcji akustycznej, pochłaniania przez powietrze oraz rozpraszania na turbulencjach. Drugie kryterium dotyczyło ruchu lotniczego na badanym lotnisku. Według Larssona wyznaczenie wskaźnika średniorocznego FBN na podstawie średniej z kilku dni jest możliwe, kiedy w trakcie tych dni ruch lotniczy nie jest niższy, niż średnia jego wartość z całego roku, pomniejszona o odchylenie standardowe. Dodatkowo warunki meteorologiczne muszą spełniać warunek dany nierównością,

$$k \approx \frac{(0.6 \cdot \Delta T \cdot \Delta u)}{2} \geq -0.3, \quad (4.1)$$

gdzie ΔT oraz Δu oznaczają odpowiednio różnice temperatury oraz prędkości wiatru mierzone na wysokościach 0.5 m oraz 10 m. Wyniki które otrzymał Larsson dają dokładność ± 1 dB w przypadku oceny FBN oraz ± 2 dB w przypadku oceny poziomu maksymalnego, dla punktu pomiarowego oddalonego o 6 km od badanego lotniska (Stockholm-Arlanda). Metoda przedstawiona przez Larssona jest zależna od ukształtowania terenu oraz rodzaju powierzchni. Nie musi się ona zatem sprawdzać w przypadku innych lotnisk. Co prawda wykonano pomiary na lotnisku wojskowym Uppsala, jednak ze względu na zbyt wysoki poziom tła akustycznego, niemożliwa była ocena oparta o wskaźnik FBN. Jest to znaczny mankament metody, gdyż dość często lotnisko zlokalizowane jest w pobliżu innych źródeł hałasu. Powodują one podwyższenie tła akustycznego, a tym samym podwyższenie wypadkowego równoważnego poziomu dźwięku. W przypadku oceny opartej o poziom maksymalny, rozbieżność wyników dla lotniska Uppsala wynosiła ± 3 dB, co nie jest zadowalające.

Bardzo podobne wyniki uzyskano w pracy [32]. Oceniano w niej estymację wskaźników CNEL⁵ oraz DNL⁶ w oparciu o pomiary krótkotrwałe. Dokładność $+2$ dB i -3 dB względem jednorocznej wartości rzeczywistej otrzymano w kilku sytuacjach:

- 30-dniowy pomiar ciągły,

⁵ CNEL – Community Noise Equivalent Level – wskaźnik oceny hałasu stosowany w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, który podobnie jak wskaźnik L_{DWN} uwzględnia kary dla pór wieczornej oraz nocnej odpowiednio 5 i 10 dB.

⁶ DNL – Day Night Average Level – wskaźnik oceny hałasu który wyróżnia dwie pory doby dzienną i nocną. Wkład energii akustycznej pory dziennej do wartości całkowitej wynosi 15/24 zaś pory nocnej 9/24.

- 14 losowo wybranych dni w ciągu roku w taki sposób, aby odstęp pomiędzy nimi był większy niż 8 dni,
- 3 losowo wybrane tygodnie w roku.

Autorzy pracy do oceny hałasu wykorzystywali dobowe wartości wskaźników CNEL i DNL i porównywali je z tymi dla całego roku. Uzyskane wyniki dały rozrzut większy aniżeli zakładany w niniejszej pracy doktorskiej, dodatkowo dotyczą one innych niż analizowane w tej pracy wskaźników oceny hałasu. Na uwagę zasługuje za to sposób próbkowania, polegający na wyborze kilku dni w roku, który może mieć wpływ na końcowy wynik estymacji.

Różne strategie próbkowania przedstawiono również w pracy [33]. Autorzy zajmowali się w niej oceną rocznej wartości równoważnego poziomu dźwięku dla hałasu samochodowego w oparciu o pomiary krótkotrwałe. Według nich, już 6 losowo wybranych dobowych wartości równoważnego poziomu dźwięku A estymuje wartość średnioroczną równoważnego poziomu dźwięku, z rozrzutem mniejszym niż 3 dB. Poziom ufności jaki przyjęto w przypadku tego wyniku wynosił 90 %. Wyniki dotyczą wartości mierzonych przy bardzo ruchliwej ulicy w centrum miasta.

Przywołane dotychczas pozycje literaturowe nie dotyczyły wskaźników L_{DWN} oraz L_N . Nie oznacza to jednak, że nie wykonywano badań ich dotyczących. Można znaleźć prace, które pokazują jak różnią się wartości mierzone przez cały rok w stosunku do tych prezentowanych w mapach akustycznych. Takie badania przeprowadzono m. in. w Gdańsku [34] czy w Madrycie [35]. Weryfikacja map akustycznych w ten sposób z ekonomicznego punktu widzenia jest wysoce nieopłacalna. Co więcej, nie da się takim sposobem szybko zweryfikować obliczeń wykonywanych przy użyciu programu komputerowego. Problem skrócenia czasu oceny był przedmiotem badań w ramach programu IMAGINE. Część wyników tego programu przedstawiono w opracowaniu [4].

Kilkudziesięciostronicowa broszura podaje wytyczne jakimi należy się kierować w ocenie wskaźników długookresowych na podstawie pomiarów. Wytyczne dopuszczają wykonywanie pomiarów zarówno krótkotrwałych jak i długotrwałych. Dokument ten definiuje szereg pojęć, jak również zawiera wytyczne dotyczące aparatury pomiarowej. Podczas badań prowadzonych w tym projekcie wypracowano również wskazania dotyczące estymacji wskaźników długookresowych w oparciu o pomiary krótkoterminowe. Według tych wytycznych, chcąc uzyskać wiarygodne wyniki wskaźników długookresowych, należy wykonać pomiary w kilku seriach tak, aby

uwzględniały one zróżnicowane warunki pogodowe w ciągu roku. Wartość średnioroczną uzyskuje się korzystając z następującej formuły,

$$L_{long} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n p_i \cdot 10^{0.1 \bar{L}_i}, \quad (4.2)$$

gdzie p_i oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia warunków atmosferycznych i -tej klasy, \bar{L}_i to średni poziom zmierzony dla tych warunków atmosferycznych. W [4] wyróżniono $n = 4$ klasy warunków meteorologicznych. W przypadku gdy punkt pomiarowy znajduje się blisko źródła, wpływ warunków atmosferycznych można pominąć.

Kolejną rzeczą o którą należy zadbać, to o to aby wyniki pomiarów były niezależne. Wartości w tab.4.3 określają kiedy, taka sytuacja ma miejsce.

Tab.4.3. Minimalny czas pomiędzy dwoma sesjami pomiarowymi pozwalający uznać je za niezależne [4]

Odległość od źródła hałasu [m]	< 100		100-300		> 300	
	Dzień	Noc	Dzień	Noc	Dzień	Noc
Hałas drogowy	24 h	24 h	48 h	48 h	72 h	72 h
Hałas kolejowy	24 h	24h/źródło ¹	48 h	72 h	72 h	72 h
Hałas przemysłowy	źródło	źródło	48 h	48 h	72 h	72 h
Hałas lotniczy²	źródło	źródło	źródło	źródło	źródło	źródło

¹ jeśli dominującymi w ruchu są pociągi towarowe

² zależne od typu operacji

W przypadku pomiarów większości typów hałasów możemy mówić o nich jako niezależnych, gdy wykona się je w pewnych odstępach czasowych. Dla hałasu lotniczego niezależnymi są kolejne operacje lotnicze, a czas pomiędzy kolejnymi sesjami pomiarowymi nie ma znaczenia. Dodatkowe wytyczne odnośnie hałasu lotniczego mówią, że poziom średnioroczny powinien być obliczany z wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. Wartości te powinny być reprezentatywne dla lotniska, uwzględniając typy samolotów, rodzaje operacji lotniczych, itd. Niestety nie sprecyzowano ile i jakie operacje należy brać pod uwagę. Chcąc np. zmierzyć hałas wszystkich typów samolotów może się okazać, że pomiary będziemy wykonywali przez cały rok. Aby metoda ta była kompletna, należałoby wskazać przesłanki jakimi należy się kierować w wyborze statków

powietrznych, a które uwzględniane byłyby przy estymacji wskaźników średniorocznych L_{DWN} oraz L_N .

Uzupełnieniem opracowania [4] są dwie prace teoretyczne, w których przedstawiono metodę obliczania wskaźników długookresowych na podstawie danych pomiarowych. W przypadku pracy [36] autorzy pokazują jak, obliczyć średnioroczny równoważny poziom dźwięku $L_{Aeq,T}$ w oparciu o zbiór wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. W pracy tej uwzględniono podział na kilka kategorii wydarzeń akustycznych oraz wskazano metodę obliczania niepewności. Według autorów, kategoryzacja wydarzeń podobnie jak w przypadku opracowania [4], powinna być związana głównie z różnymi klasami warunków meteorologicznych. Autorzy dzielą warunki meteorologiczne na sprzyjające oraz niesprzyjające propagacji hałasu.

Druga praca tych samych autorów [37], skupia się na metodzie obliczania wskaźnika L_{DWN} bazującej na kilkudniowych pomiarach, w oparciu o wskaźniki L_D, L_W, L_N . Autorzy pokazują, jak z kilku reprezentatywnych, 24-godzinnych próbek wartości równoważnego poziomu dźwięku obliczyć wskaźniki średnioroczne oraz niepewność tej estymacji σ_L na podstawie m próbek pomiarowych,

$$\langle L_{DWN} \rangle = 10 \cdot \log \left\{ \frac{12}{24 \cdot m} \sum_{i=1}^m 10^{0.1 \cdot L_{Di}} + \frac{4 \cdot \sqrt{10}}{24 \cdot m} \sum_{i=1}^m 10^{0.1 \cdot L_{Wi}} + \frac{80}{24 \cdot m} \sum_{i=1}^m 10^{0.1 \cdot L_{Ni}} \right\}, \quad (4.3)$$

$$\sigma_L \approx \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{10^{-0.1 \langle L_{DWN} \rangle}}{\sqrt{m}} \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_D^2 + \frac{5}{18} \sigma_W^2 + \frac{100}{9} \sigma_N^2 + \frac{10}{6} C_{DW} + \frac{10}{3} C_{DN} + \frac{10 \cdot \sqrt{10}}{9} C_{WN}} \quad (4.4)$$

W powyższym wyrażeniu symbole C_{DW}, C_{DN}, C_{WN} oznaczają kowariancje pomiędzy wartościami energii akustycznej w poszczególnych porach doby, zaś $\sigma_D, \sigma_W, \sigma_N$ to jej odchylenia standardowe. Niestety żadna z przytoczonych prac [36], [37] nie podaje, czym kierować się podczas wybierania „reprezentatywnej” próby.

W ostatnich latach pojawiło się kilka prac empirycznych, w których badano korelację wielkości mierzonych z wynikami obliczeń prezentowanych w mapach akustycznych. W pracy [38] zaprezentowano porównanie wartości obliczonych w mapach akustycznych hałasu drogowego z wartościami mierzonymi w różnych interwałach czasowych. Wykazano, że pomiary całoroczne, mające na celu weryfikację poprawności

obliczeń akustycznych w ramach map akustycznych, można zastąpić reprezentatywnymi pomiarami tygodniowymi. Według autorów referatu, najmniejsze różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi, a obliczonymi uzyskuje się między 33 a 35 tygodniem roku (sierpień). Spowodowane jest to najpewniej parametrami ruchu zbliżonymi do tych przyjętych w modelowaniu podczas tworzenia mapy akustycznej. Prawdopodobnie w przypadku innego miasta i miejsca pomiarowego wyniki byłyby inne. W tab.4.4 przedstawiono wybrane wyniki tejże pracy.

Tab.4.4. Różnice pomiędzy wartościami obliczonymi dla całego roku i zmierzonymi w trakcie krótkotrwałych pomiarów [38]

Lokalizacja	L_D [dB]	L_W [dB]	L_N [dB]	L_{DWN} [dB]
1 – Universitätsalle	-0.7	-0.8	2.6	0.8
2 – Neuenlanderstrasse	-3.5	-7.8	0.1	-2.0
3 – Dobbenweg	-2.1	4.4	3.7	0.5
5 – Freidhof Hemenligen	1.4	0.6	1.5	1.3
6 – Arsten	-2.9	-3.1	-1.2	-1.9

Tab.4.4 pokazuje, że różnice pomiędzy wartościami obliczanymi, a tymi z pomiarów krótkotrwałych nie przekraczają 2 dB dla L_{DWN} oraz 3.7 dB dla L_N . Co prawda praca ta dotyczyła hałasu drogowego, jest ona jednak dobrym prognostykiem dla badań hałasu lotniczego, który jest przedmiotem niniejszej dysertacji.

We wspomnianej już pracy [35] przedstawiono wyniki ciągłego monitoringu hałasu porównując je z wartościami obliczonymi. Naukowcy z Hiszpanii rejestrowali jednogodzinne wartości równoważnego poziomu dźwięku w 26 punktach pomiarowych zlokalizowanych w Madrycie przez cały rok 2006. Na ich podstawie obliczano dobowe wartości wskaźnika $L_{DWN}^{(i)}$. Duża baza, danych umożliwiła wykonywanie eksperymentów komputerowych polegających na wirtualnych pomiarach krótkoterminowych. Na podstawie m losowo wybranych, dobowych wartości $L_{DWN}^{(i)}$, autorzy obliczali k -krotnie średnią wartość $\langle L_{DWN} \rangle^{(k)}$ zgodnie ze wzorem,

$$\langle L_{DWN} \rangle^{(k)} = 10 \cdot \log \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m 10^{0.1 L_{DWN}^{(i)}} \right\}. \quad (4.5)$$

Czynność tę powtarzano $k = 1000$ razy, otrzymując zbiór wartości $\langle L_{DWN} \rangle^{(k)}$. Następnie dla tego zbioru obliczano odchylenie standardowe $\sigma_{\bar{L}_{DWN}}$ oraz wartość średnią \bar{L}_{DWN} . Estymowane wyniki porównywano z wartościami L_{DWN} zmierzonymi w przeciągu całego roku. W poniższej tabeli przedstawiono wybrane wyniki, dla $m = 5, 10, 20$ oraz 40 dób.

Tab.4.5. Porównanie wartości uzyskanych w eksperymencie komputerowym z wartościami rzeczywistymi [35]

Lokalizacja	Cały rok		$m = 5$		$m = 10$		$m = 20$		$m = 40$	
	L_{DWN}	σ	\bar{L}_{DWN}	$\sigma_{\bar{L}_{DWN}}$	\bar{L}_{DWN}	$\sigma_{\bar{L}_{DWN}}$	\bar{L}_{DWN}	$\sigma_{\bar{L}_{DWN}}$	\bar{L}_{DWN}	$\sigma_{\bar{L}_{DWN}}$
1	67.4	1.3	67.2	0.9	67.3	0.7	67.3	0.6	67.4	0.4
2	70.3	1.2	70.3	0.9	70.3	0.6	70.3	0.5	70.3	0.4
3	68.1	2.5	67.0	2.4	67.3	2.4	67.5	2.0	67.7	1.5
4	74.7	1.2	74.7	0.6	74.7	0.5	74.7	0.3	74.7	0.2
5	68.7	1.2	68.7	0.5	68.7	0.4	68.7	0.3	68.7	0.2
6	73.7	1.3	73.7	0.6	73.7	0.5	73.7	0.3	73.7	0.2
7	72.4	1.4	71.9	1.7	72.0	1.7	72.1	1.5	72.2	1.3
8	70.6	2.0	70.4	1.1	70.5	0.8	70.5	0.5	70.5	0.4
9	73.7	1.1	73.6	0.5	73.7	0.3	73.7	0.2	73.7	0.2
10	70.0	1.9	69.7	1.4	69.8	1.2	69.9	1.0	69.9	0.7
11	74.4	3.7	64.4	5.2	65.4	5.9	66.8	6.7	68.6	6.8
12	72.4	0.9	72.3	0.5	72.3	0.4	72.3	0.3	72.3	0.2
13	74.1	0.8	74.1	0.4	74.1	0.3	74.1	0.2	74.1	0.2
14	66.4	1.2	66.3	0.8	66.4	0.6	66.4	0.4	66.4	0.3
15	65.7	3.1	61.2	3.6	62.1	4.2	62.6	4.0	63.3	3.9
16	67.6	1.5	66.6	1.7	66.9	2.1	66.8	1.8	67.1	1.8
17	67.5	1.4	67.2	1.2	67.4	1.1	67.4	1.0	67.5	0.8
18	69.9	1.2	69.8	0.5	69.8	0.4	69.9	0.3	69.9	0.2
19	69.9	1.6	69.6	1.2	69.8	1.1	69.8	0.9	69.9	0.7
20	68.4	1.2	68.3	0.6	68.3	0.5	68.4	0.3	68.4	0.2
21	56.5	1.9	56.3	1.0	56.4	1.0	56.5	0.7	56.5	0.5
22	68.3	1.1	68.3	0.6	68.3	0.4	68.3	0.3	68.3	0.2
23	66.4	1.5	66.2	1.3	66.2	0.9	66.2	0.8	66.3	0.7
24	69.5	2.3	69.4	1.2	69.4	0.9	69.4	0.7	69.5	0.5
25	63.5	1.7	62.7	1.9	62.8	1.8	63.0	1.6	63.1	1.5
26	64.6	1.6	69.9	1.3	64.5	0.8	64.5	0.5	64.6	0.4

Jak widać, już dla $m = 5$ dni otrzymuje niewielkie różnice pomiędzy prawdziwą wartością średnioroczną, a tą otrzymaną w wyniku losowania. Za wyjątkiem kilku lokalizacji różnice te nie przekraczają wartości 1 dB. Zdarza się (punkty 11, 15), że nawet wybrane losowo 40 dni pomiarowych daje wynik różniący się znacząco od prawdziwej wartości średniorocznej. Autorzy jednak nie podają czym może być to spowodowane. Przyczyną tego może być np. nieuwzględnienie rozkładu prawdopodobieństwa wartości, z których losowane były poszczególne próby.

Podsumowując dotychczasowe prace związane z estymacją wskaźników hałasu w oparciu o próby, można stwierdzić, że nie istnieje kompletna metoda estymacji wskaźników L_{DWN} oraz L_N w oparciu o zbiór wartości L_{AE} . W kilku pracach pokazano, że możliwe jest skuteczne estymowanie wartości średniorocznych w oparciu o krótkie pomiary także w przypadku hałasu lotniczego [31][32][35][38]. Żadna z tych prac nie pokazuje jednak jak wykonywać pomiary wartości L_{AE} oraz jakie z tych wartości wybierać do próby, aby estymowane wartości L_{DWN} oraz L_N spełniały postawione na początku pracy założenie.

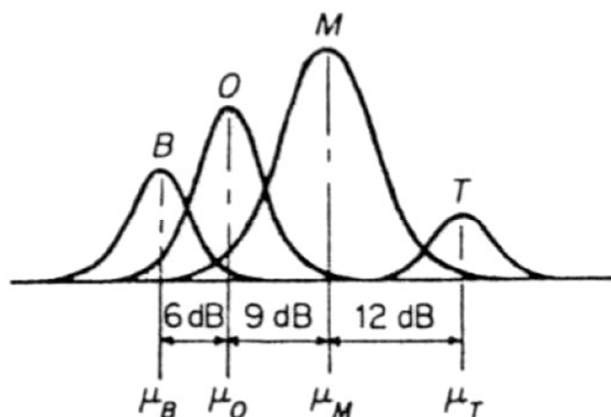
4.3. Analiza rozkładów statystycznych wskaźników oceny hałasu

Skuteczność metody estymacji wskaźników długookresowych na podstawie krótkich pomiarów, jest zależna od funkcji gęstości prawdopodobieństwa danych wykorzystywanych do estymacji. We wspomnianej już pracy [30] wykazano, iż istnieje zależność pomiędzy dokładnością estymacji, a sposobem wyboru danych wejściowych. Czynnikiem ten jest także istotny również w przypadku oceny wskaźników długookresowych. Ważnym jest, aby wiedzieć jakie mogą być przyczyny zróżnicowanych kształtów funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Wiedza ta pozwala na odpowiedni dobór próbek reprezentatywnych dla całego roku. W przypadku gdy rozkład zmiennej jest jednomodalny i skupiony, sposób wyboru danych nie wpływa znacząco na wynik. Wraz z rozszerzaniem się rozkładu, większym odchyleniem standardowym, wynik estymowany mocno zależy od kryterium wyboru danych. Istnieją prace takiej jak [39][40], które pokazują jakie mogą być przyczyny zróżnicowania kształtów funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Żadna z prac nie dotyczy hałasu lotniczego. Na ich podstawie można wyciągnąć jednak pewne wnioski jakościowe, które określają na co należy zwrócić uwagę w przypadku rozkładów poziomów hałasu lotniczego.

W pracy [39] skupiono się na rozkładach statystycznych poziomów dźwięku hałasu drogowego. W pracy tej zauważono, że otrzymywane rozkłady hałasu rzadko mają kształt gaussowski. Dużo częściej rozkłady te są nieregularne, których maksima zależą od charakterystyk źródeł hałasu. Don i Rees [39], wypracowali model tworzenia wypadkowego histogramu hałasu drogowego, opierający się na superpozycji kilku rozkładów normalnych. Ich badania wykazały, że kształt histogramu zależy od czterech czynników:

- wartości poziomów hałasu pojazdów poruszających się po bliższym pasie ruchu,
- wartości poziomów hałasu pojazdów poruszających się na przeciwnym pasie ruchu,
- wartości poziomów hałasu pojazdów ciężkich,
- tła akustycznego.

Na rys.4.1 przedstawiono model rozkładu wypracowany przez autorów pracy [39].

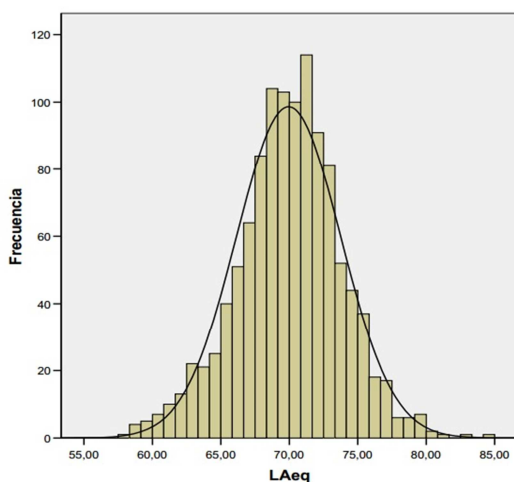


Rys.4.1. Model rozkładu prawdopodobieństwa dla hałasu drogowego[39]

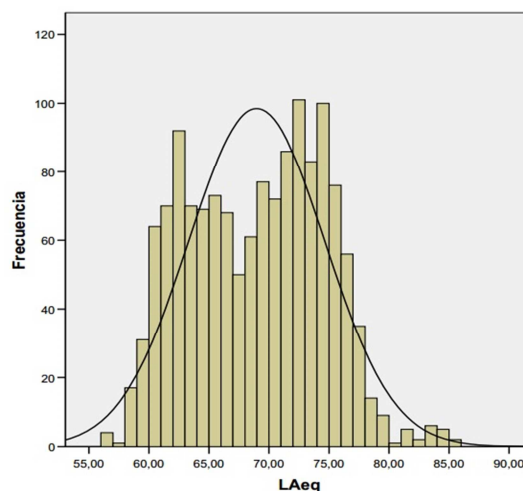
Wartość μ_B związana jest z tłem akustycznym, μ_O oraz μ_M dotyczą pojazdów lekkich odpowiednio na dalszym i bliższym pasie ruchu, wreszcie μ_T charakteryzuje hałas pojazdów ciężkich. Biorąc pod uwagę fakt, że w lotnictwie również istnieją różnego typu statki powietrzne (większe lub mniejsze, o różnym napędzie), można się spodziewać podobnych zależności.

Dodatkowym czynnikiem, mającym wpływ na kształt rozkładów statystycznych hałasu drogowego, jest prędkość ruchu pojazdów oraz natężenie ruchu [41][42][43]. Według autorów publikacji [41], gdy mamy do czynienia z nie zaburzonym potokiem

pojazdów, rozkład jednosekundowych wartości równoważnego poziomu dźwięku z reguły przyjmuje kształt symetryczny jednomodalny – rozkład normalny. Gdy punkt pomiarowy znajduje się w pobliżu sygnalizacji świetlnej, kształt rozkładu zmienia się, co zaobserwowano również w pracy [44]. W zależności od sytuacji, w rozkładzie ujawniają się dodatkowe maksima związane z przyspieszaniem, spowalnianiem, jak również z pulsującym ruchem pojazdów. Wyniki uzyskane w pracy [45], potwierdzają obserwacje z pracy [41]. Na rys.4.2 oraz rys.4.3 przedstawiono rozkłady poziomów dla dwóch sytuacji opisywanych w pracy [41].



Rys.4.2. Histogram równoważnego poziomu dźwięku ruchu jednorodnego[41]



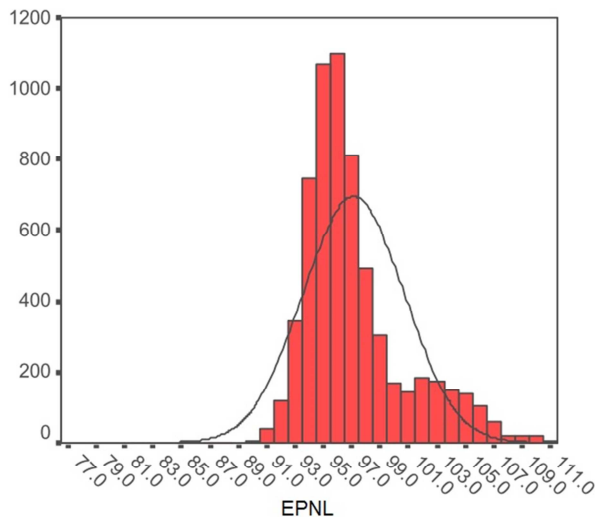
Rys.4.3. Histogram równoważnego poziomu dźwięku ruchu przerywanego [41]

Podobny histogram, do tego przedstawionego na rys.4.3 można otrzymać rejestrując zmiany poziomu hałasu przy lotnisku. Zróznicowanie samolotów, począwszy od małych awionetek, a skończywszy na dużych samolotach pasażerskich może powodować np. dwumodalność rozkładu. Potwierdza to przedstawiona w dalszej części pracy analiza danych pomiarowych.

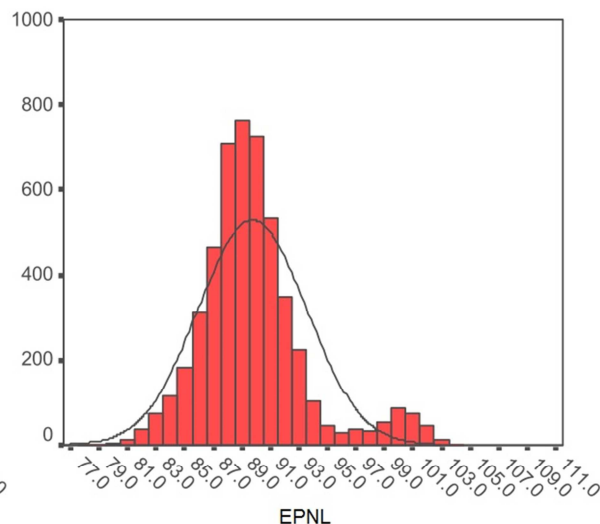
Z dostępnych opracowań wynika, że poziomy rejestrowane wokół lotnisk mogą charakteryzować się rozkładami różniącymi się od normalnego [46]. W dokumencie przygotowanym przez ERCD⁷ znaleźć można bardzo wiele analiz dotyczących hałasu lotniczego[46]. Opracowanie to dotyczy wprowadzanego na lotniskach systemu Quota Count (QC), mającego na celu sprawne zarządzanie hałasem lotniczym przez osoby niebędące akustykami np. kontrolerów lotu. Raport ten zawiera również histogramy

⁷ ERCD – Environmental Research and Consultancy Department

wskaźnika EPNL⁸. Co prawda, nie można tego wskaźnika traktować na równi z poziomem ekspozycyjnym hałasu, jednak uzyskiwane rozkłady wskazują na niejednorodność źródła hałasu lotniczego. Na rys.4.4 oraz rys.4.5 przedstawiono rozkłady poziomów EPNL dla lotniska Gatwick.



Rys.4.4. Histogram wartości EPNL dla lądowań – lotnisko Gatwick [46]



Rys.4.5. Histogram wartości EPNL dla startów – lotnisko Gatwick [46]

Otrzymane w pracy [46] kształty histogramów hałasu lotniczego prowadzą do wniosku, że przy estymacji wskaźników L_{DWN} oraz L_N , za pomocą poziomów ekspozycyjnych L_{AE} , kluczową rolę mogą odgrywać kształty histogramów mierzonych wartości L_{AE} .

4.4. Określanie niepewności złożonej, minimalizacja niepewności pomiaru

Określanie niepewności w przypadku pomiarów jest warunkiem koniecznym prawidłowego prezentowania wyników. Wartości niepewności pokazują jak dokładnie określono wartość mierzoną. Relatywnie duża wartość niepewności świadczy np. o tym, że próba jaką wzięto do estymacji danego parametru była zbyt mała.

Instrukcja ISO określania niepewności przedstawiona w [47] (GUM⁹), wyróżnia dwa rodzaje niepewności Niepewność typu A związana jest z rozrzutem statystycznym wyników pomiarów. Natomiast niepewność typu B związaną jest z niedokładnością

⁸ Effective Percieved Noise Level – wskaźnik oceny hałasu bazujący na krzywych głośności

⁹ Guide to the expression of uncertainty in measurement

aparatury pomiarowej, procedur pomiarowych etc. W przypadku pomiarów ciągłych – całorocznych wskaźników długookresowych, zasadniczym źródłem niepewności jest dokładność używanej aparatury. Zmienność zachowania źródła ma nieznaczący wpływ na wynik, ze względu na bardzo dużą próbę wartości na podstawie, której oblicza się wartości długookresowe. Małe próby z pomiarów krótkotrwałych zwiększają istotność niepewności typu A, zwłaszcza gdy wartości na podstawie których estymowany jest wskaźnik długookresowy charakteryzują się dużym rozrzutem. Całkowitą niepewność pomiaru określa niepewność złożona [48], która równa jest pierwiastkowi kwadratowemu z sumy kwadratów niepewności typu A i B.

W niniejszej pracy główną uwagę skupiono na obliczaniu niepewności typu A. Niepewność typu B dla aparatury przy pomocy której wykonywano pomiary jest znana. Nieznany jest natomiast sposób liczenia niepewności wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N bazujący na pomiarach wskaźnika krótkookresowego, tj. ekspozycyjnego poziomu hałasu L_{AE} . Obliczanie niepewności typu A wskaźnika L_{AE} sprowadza się do obliczenia odchylenia standardowego z wyników pomiarów:

$$u_A(e) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (e_j - \hat{e})^2}, \quad (4.6)$$

gdzie j oznacza j -te zarejestrowane wydarzenie akustyczne, n liczbę elementów próby, $e_j = 10^{0.1L_{AE}^{(j)}}$ a

$$\hat{e} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{0.1L_{AE}^{(j)}}. \quad (4.7)$$

Wpływ niepewności wartości L_{AE} na niepewność wskaźnika długookresowego np. L_D , określa się na podstawie poniższego prawa propagacji błędów [49]:

$$u_A(y) = \sqrt{\sum_g \left[\frac{\partial f(\dots)}{\partial x_g} \right]^2 \cdot u_A(x_g)^2}. \quad (4.8)$$

Mając na uwadze zależność (3.9), która łączy równoważny poziom dźwięku A (wskaźnik długookresowy) z ekspozycyjnym poziomem hałasu (wskaźnik krótkookresowy), możemy zapisać że,

$$Y = \frac{\tilde{N} \cdot t_0}{T} \cdot X. \quad (4.9)$$

gdzie $X = 10^{0.1 \cdot \tilde{L}_{AE}}$. Przy założeniu, że wartość \tilde{N} jest znana i ustalona, kombinacja wzorów (4.8) i (4.9) prowadzi do,

$$u_A(y) = \frac{t_0}{T} \sqrt{\tilde{N}^2 \cdot u_A^2(e)}. \quad (4.10)$$

Na podstawie tego wzoru można obliczyć niepewność rozszerzoną wskaźnika długookresowego L_D . Jak już wspomniano, wpływ na wartość niepewności ma rozrzut wartości mierzonych. Jeżeli badane źródło hałasu charakteryzuje się dużą zmiennością, w celu minimalizacji niepewności, konieczne jest wydzielenie grup wydarzeń akustycznych o zbliżonych poziomach hałasu. Przykładowe kształty histogramów pokazane na rys.4.4 oraz rys.4.5 wskazują, że możliwe jest wyodrębnienie takich grup również w przypadku operacji lotniczych. Na rys.4.5 widoczne są dwa maksima, które sugerowałyby aby podzielić te dane na dwie kategorie wydarzeń akustycznych. Również prawostronna asymetria widoczna na rys.4.4 podpowiada występowanie przynajmniej dwóch, zbliżonych do siebie poziomami, podzbiorów wartości EPNL. Rozporządzenie Ministra Środowiska [20] dopuszcza minimalizację niepewności pomiaru poprzez podział danych na podzbiory. W chwili obecnej nie istnieją jednak wytyczne, które by ten podział regulowały. Instrukcja wyrażania niepewności (GUM), uwzględnia możliwość obliczania niepewności dla danych podzielonych na kategorie. W przypadku gdy mierzone wartości krótkookresowe wymagałyby podziału na kategorie, w celu minimalizacji niepewności, możliwe jest wykorzystanie rozwiązania zaprezentowanego w GUM. Szczegółowy sposób obliczania niepewności wskaźników L_{DWN} oraz L_N z uwzględnieniem kategoryzacji operacji akustycznych, przedstawiony zostanie w rozdziale 12.

5. Dane pomiarowe

Wyniki pomiarów wartości ekspozycyjnego hałasu posłużą do stworzenia metody estymacji wskaźników długookresowych hałasu lotniczego L_{DWN} oraz L_N w oparciu o wartości krótkookresowe L_{AE} . Dane z całego roku pozwolą, po pierwsze określić rzeczywiste poziomy długookresowe w kilku punktach wokół lotniska, po drugie posłużą do przeprowadzenia kilku eksperymentów. W eksperymentach tych określona zostanie minimalna moc oraz zawartość zbioru wartości L_{AE} niezbędnych do estymacji wskaźników L_{DWN} i L_N która spełniać będzie założenie, że poziom estymowany nie może różnić się o więcej niż 1.5 dB od wartości rzeczywistej.

5.1. Opis bazy danych oraz metodyki pomiarowej

Do badań przeprowadzanych w ramach niniejszej dysertacji, wykorzystywano bazę danych pomiarowych udostępnioną przez Port Lotniczy Poznań – Ławica Sp. z o. o. Wyniki zebrane w bazie danych pochodzą z systemu monitoringu hałasu, który działa na terenie oraz wokół portu lotniczego od 1 kwietnia 2011 roku. Monitoring ten wykonywany jest ze względu na wymagania Ministra Środowiska, które stanowią m. in. że lotniska, na których liczba operacji lotniczych przekracza 10000 operacji rocznie, muszą być objęte ciągłym monitoringiem hałasu [20].

System monitoringu składa się z czterech stacji pomiarowych, rejestrujących w sposób ciągły zmiany jednosekundowego, równoważnego poziomu dźwięku A, $L_{Aeq,1sek}$. Dwie stacje mierzą hałas w sposób nieprzerwany w stałych lokalizacjach. Pozostałe dwie to stacje mobilne, które przenoszone są w nowe miejsca po upływie jednego miesiąca. Łącznie stacje mobilne obsługują 13 lokalizacji zaś w każdym miesiącu mierzą hałas jednocześnie tylko w dwóch z nich. Sekwencja zmian lokalizacji jest tak zorganizowana aby odstępy pomiędzy pomiarami w danym punkcie były większe niż 2-3 miesiące.

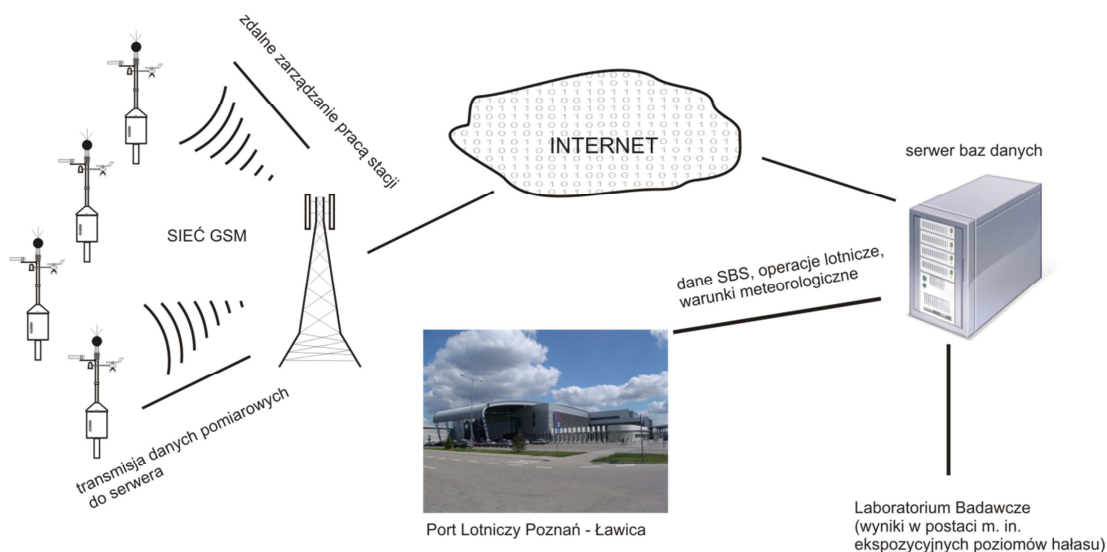
Urządzenia, w które wyposażone zostały stacje pomiarowe obsługiwane są zdalnie, a poprawność ich działania weryfikowana jest przez systematyczną kalibrację toru pomiarowego przy użyciu wzorca akustycznego. Każdy z punktów pomiarowych obsługiwany jest przez miernik poziomu dźwięku klasy I, co zapewnia niepewność

pomiaru typu B równą ± 1.1 dB. Na rys.5.1 przedstawiono jedną ze stacji monitorujących hałas w pobliżu lotniska Ławica.



Rys.5.1. Stacja monitoringu hałasu – wysokość punktu pomiarowego $h = 4$ m

Jak już wspomniano mierniki zamontowane w stacjach rejestrują jednosekundowe wartości równoważnego poziomu dźwięku A. Dane te zapisywane są do ich pamięci, a następnie przesyłane poprzez łącze internetowe do serwera, gdzie poddawane są dalszej obróbce. Dodatkowo serwer zbiera dane radarowe, dane meteorologiczne oraz informacje o godzinach poszczególnych operacji lotniczych. Schemat systemu monitoringu hałasu przedstawiono na rys.5.2



Rys.5.2. Schemat systemu monitoringu hałasu

Na podstawie gromadzonych danych, określany jest ekspozycyjny poziom hałasu dla danej operacji lotniczej. Procedura ta jest zgodna z warunkami podanymi w rozdziale 2.2. W przypadku, gdy niemożliwa jest identyfikacja wydarzenia akustycznego (np. zbyt wysoki poziom tła akustycznego), operacja lotnicza nie jest brana pod uwagę. Drugim powodem, eliminującym zmierzoną wartość L_{AE} mogą być niekorzystne warunki atmosferyczne. Dopuszcza się wykonywanie pomiarów kiedy:

- temperatura mieści się w przedziale od -10°C do 50°C ,
- wilgotność mieści się przedziale od 25% do 98%,
- prędkość wiatru nie przekracza 5 m/s,
- ciśnienie atmosferyczne mieści się w przedziale od 900 hPa do 1100 hPa,
- nie występują opady atmosferyczne.

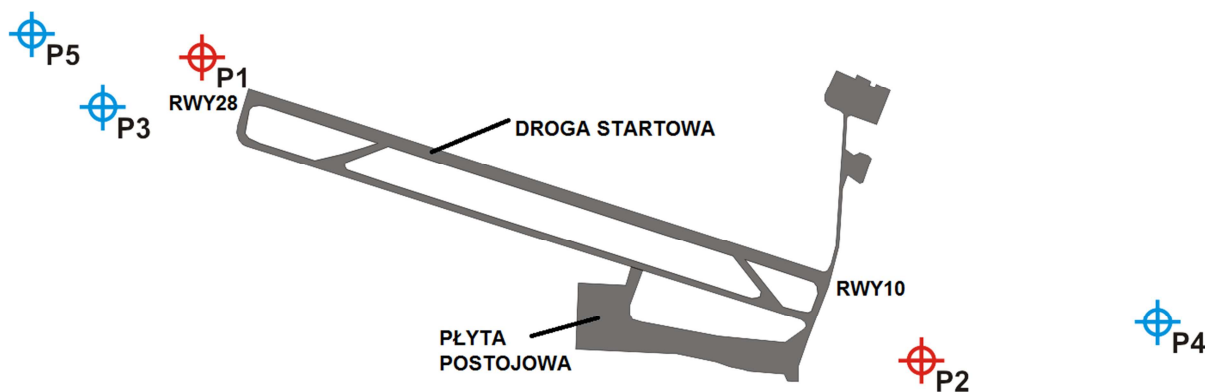
Z danych otrzymanych z Portu Lotniczego Ławica do analiz wybrano wyniki, z punktów pomiarowych P1 i P2 (rys.5.3) otrzymane w roku 2012. Dodatkowo wybrano dane z punktów mobilnych, w których okres pomiarów w sumie był dłuższy niż 4 miesiące. Spośród 13 punktów warunek taki spełniły 3 lokalizacje. Były to punkty pomiarowe P3, P4 oraz P5 (rys.5.3). Należy dodać, że pomiary przy użyciu stacji mobilnych były wykonywane na przestrzeni dwóch i pół roku tj. od kwietnia 2011 do września 2013. W tab.5.1 przedstawiono zestawienie przedziałów czasu wykonywania pomiarów w poszczególnych punktach pomiarowych.

Tab.5.1. Daty wykonywania pomiarów w poszczególnych lokalizacjach znajdujących się na terenie i wokół lotniska Poznań-Ławica, które wykorzystano w niniejszej rozprawie

Numer punktu	Od	Do
P1	2012-01-01	2013-01-01
P2	2012-01-01	2013-01-01
P3	2011-05-01	2011-06-01
	2012-01-01	2012-02-01
	2012-08-01	2012-09-01
	2012-11-01	2012-12-01
	2013-04-01	2013-05-01

Numer punktu	Od	Do
P4	2011-05-01	2011-06-01
	2012-02-01	2012-03-01
	2012-08-01	2012-09-01
	2012-12-01	2013-01-01
	2013-04-01	2013-05-01
P5	2011-09-01	2011-10-01
	2012-06-01	2012-07-01
	2012-12-01	2013-01-01
	2013-03-01	2013-04-01
	2013-07-01	2013-08-01

Punkty pomiarowe zlokalizowane były w najbliższym otoczeniu lotniska, zgodnie z wytycznymi podanymi w normie [14] oraz rozporządzeniu [20]. W przypadku stacji mobilnych, odległość od punktu ARP¹⁰ przekraczała 2 km. Stałe stacje monitoringu hałasu w punktach P1 i P2 zlokalizowane były odpowiednio 1.8 km i 1.4 km od punktu ARP. Schematyczne rozmieszczenie punktów pomiarowych, z których wyniki wykorzystywano podczas badań przedstawiono na rys.5.3.



Rys.5.3. Rozmieszczenie punktów monitoringu hałasu wokół lotniska Poznań-Ławica

¹⁰ Aerodrome Reference Point - Punkt Odniesienia Lotniska - punkt wyznaczony na środku dróg startowych lotniska lub na ich przecięciu; wyznacza położenie portu lotniczego.

Pojedynczy rekord przekazanej bazy danych zawierał następujące informacje:

- data i godzina operacji lotniczej,
- typ operacji lotniczej (start, lądowanie),
- kierunek operacji lotniczej (RWY 10, RWY 28)¹¹,
- typ statku powietrznego,
- numer rejestracyjny statku powietrznego,
- numer lotu,
- linia lotnicza,
- ekspozycyjny poziom hałasu z podziałem na stacje pomiarowe,
- warunki atmosferyczne panujące podczas operacji lotniczej.

Przykładową próbkę danych przedstawiono w tab.5.2.

¹¹ RWY – (ang. RUNWAY) zasadnicza część lotniska o utwardzonej nawierzchni najczęściej betonowej przeznaczona do startów oraz lądowań statków powietrznych. Drogi startowe ponumerowane są zgodnie z azymutem magnetycznym zaokrąglonym do najbliższej dziesiątki stopni.

Tab.5.2. Przykładowe dane pomiarowe otrzymane z Portu Lotniczego Poznań – Ławica

L.p.	data	czas lokalny	rodzaj operacji	RWY	typ statku	nr rej.	właściciel	nr lotu	P_ref_1	P_ref_2	P_5	P_6
186	2012-06-03	16:28	lądowanie	28	A320	HALPM	Wizz Air Hungary Kft.	W61956	*	84.7	**	88.1
187	2012-06-03	16:31	start	28	AT7	ECKAD	OLT Express Regional Sp. z o.o.	O2154	*	**	87.0	**
188	2012-06-03	17:00	start	28	DH4	DADHA	Deutsche Lufthansa S.A. Oddział w Polsce	LH1639	85.1	**	79.2	**
189	2012-06-03	17:19	lądowanie	28	B738	EIDAN	Ryanair Limited	FR8216	**	85.5	**	91.0
190	2012-06-03	17:23	start	28	B738	SPENY	ENTER AIR SP. Z O.O.	ENT7371	103.6	**	98.2	**
191	2012-06-03	17:28	lądowanie	28	DH8D	SPEQB	Polskie Linie Lotnicze LOT S.A.	LO3949	**	80.1	**	86.5
192	2012-06-03	17:32	lądowanie	28	AT4	SPEDF	Polskie Linie Lotnicze LOT S.A.	LO364	**	82.4	**	87.5
193	2012-06-03	17:45	start	28	A320	HALPM	Wizz Air Hungary Kft.	W61963	96.2	78.1	93.0	**
194	2012-06-03	18:15	start	28	B738	EIDAN	Ryanair Limited	FR8217	98.9	**	94.3	**
195	2012-06-03	18:17	start	28	DH8D	SPEQB	Polskie Linie Lotnicze LOT S.A.	LO3950	86.2	**	84.6	**
196	2012-06-03	18:39	start	28	B734	SPENE	ENTER AIR SP. Z O.O.	ENT773	98.9	**	95.0	**
197	2012-06-03	18:46	start	28	AT7	ECKUL	OLT Express Regional Sp. z o.o.	O2217	84.5	**	81.3	**
198	2012-06-03	19:00	lądowanie	28	B734	SPENE	ENTER AIR SP. Z O.O.	ENT773	**	86.8	**	92.0
199	2012-06-03	19:07	lądowanie	28	AT7	ECKVI	OLT Express Regional Sp. z o.o.	O2273	**	81.8	**	90.2
200	2012-06-03	19:23	start	28	AT4	SPEDF	Polskie Linie Lotnicze LOT S.A.	LO371	84.7	84.1	85.7	**

Oznaczenia:

L_{AE} – ekspozycyjny poziom dźwięku A operacji lotniczej

*

** – zbyt mały odstęp hałasu operacji lotniczej od tła akustycznego

*** – w trakcie operacji lotniczej warunki meteo były niezgodne z wymaganiami

RWY – kierunek (28 – start na zachód, lądowanie ze wschodu, 10 – start na wschód, lądowanie z zachodu)

Biorąc pod uwagę wszystkie wyżej wymienione warunki związane z lokalizacją punktów pomiarowych oraz liczbą dostępnych danych, do analiz wykorzystano dość pokaźny zbiór wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. Liczebności zarejestrowanych wartości L_{AE} dla poszczególnych operacji lotniczych, z podziałem na punkty pomiarowe przedstawiono w tab.5.3.

Tab.5.3. Liczebność zbiorów wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu w poszczególnych punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy	Liczba zarejestrowanych startów	Liczba zarejestrowanych lądowań
P1	6199	1719
P2	1003	5529
P3	2150	639
P4	387	1857
P5	2838	735

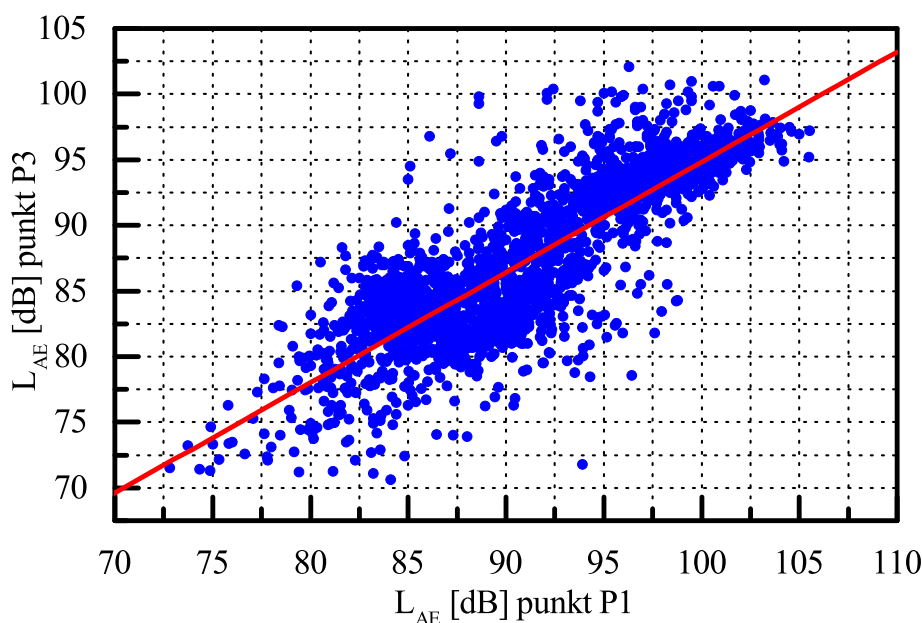
Kryterium, które przyjęto dla przypisania danej operacji do punktu pomiarowego było następujące: start lub lądowanie odbywały się nad danym punktem pomiarowym. Z analiz wyłączono wyników pomiarów, w których dana operacja była rejestrowana w punkcie pomiarowym mimo, że ścieżka startu bądź lądowania nie przebiegała w pobliżu punktu pomiarowego. Sytuacje takie miały miejsce np. gdy lądujący samolot używał tzw. odwracacza ciągu¹². Pominięcie tych wartości nie ma znacznego wpływu na wartości średnioroczne ze względu na to, że rejestrowane poziomy są wtedy o około 20 dB mniejsze od mierzonych w trakcie przelotu. Należy również dodać, że nie dla każdej operacji lądowania w punkcie odbioru rejestruje się wzrost poziomu dźwięku wywołany użyciem rewersu.

¹² Odwracacz ciągu – rewers, wsteczny ciąg to urządzenie które zmienia kierunek ciągu silnika samolotu. Jest ono wykorzystywane podczas lądowania i służy do hamowania statku powietrznego. Dzięki jego zastosowaniu możliwe jest hamowanie gdy droga startowa jest śliska. Bardzo często piloci używają go w celu skrócenia drogi kołowania do terminala oraz oszczędzania hamulców oraz opon.

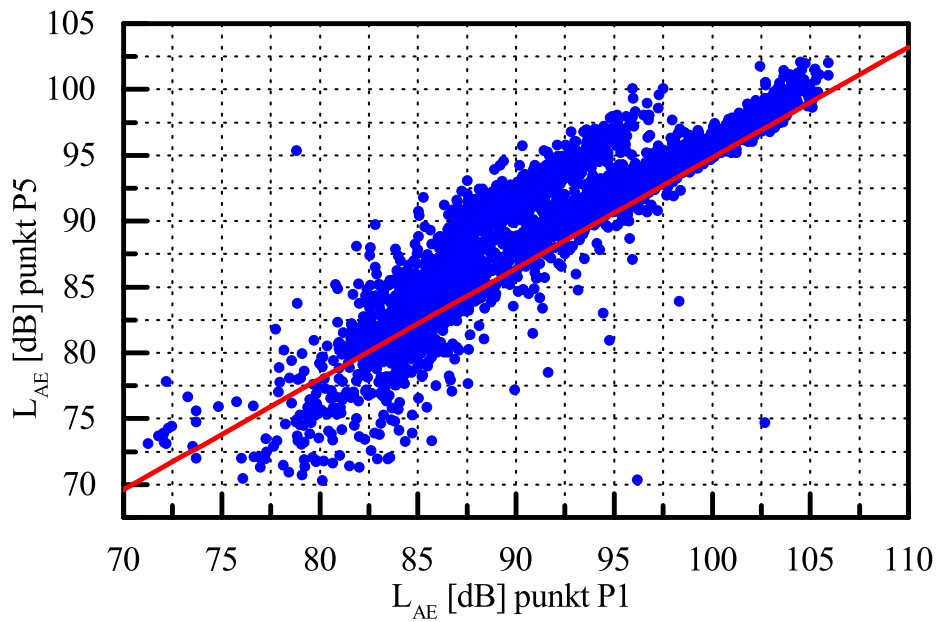
5.2. Rzeczywiste wartości wskaźników L_{DWN} oraz L_N

Na podstawie zbioru danych opisanego w rozdziale 5.1, korzystając ze wzorów (2.13), (3.6) obliczono wartości wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w punktach P1 i P2. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab.5.4.

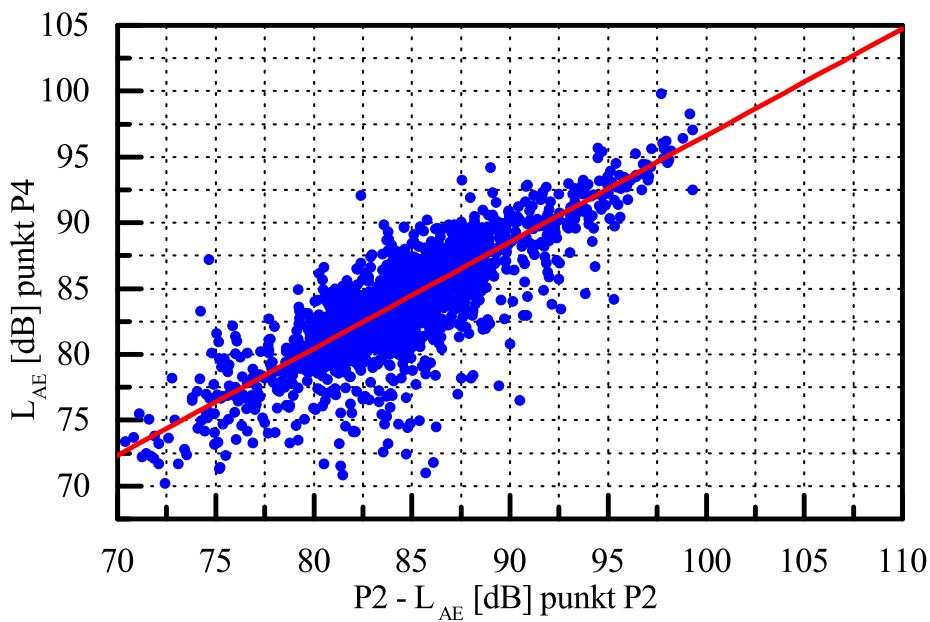
Dodatkowo wykonano obliczenia tych samych wskaźników dla punktów P3, P4 oraz P5. Z racji tego, że nieznane są wszystkie wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu (patrz tab.5.1) dla całego roku 2012 roku w tych punktach, przy obliczaniu wartości L_{DWN} oraz L_N zastosowano pewne przybliżenie. Polegało ono na wyliczeniu średniego poziomu ekspozycyjnego w punktach P3 – P5 na podstawie wartości średniorocznych L_{AE} w punktach P1 i P2. Korzystając z danych rejestrowanych w punktach P1 i P2 oraz P3 – P5 otrzymano zależności przedstawione na rysunkach 5.4, 5.5 oraz 5.6. Następnie, do każdej z nich dopasowano metodą najmniejszych kwadratów funkcje liniową (czerwona linia na wykresach). Później na podstawie dopasowania, określono równania prostych, które wykorzystano do obliczenia wartości średniorocznych ekspozycyjnego poziomu hałasu w punktach P3 – P5.



Rys.5.4. Zależność pomiędzy ekspozycyjnymi poziomami hałasu w punktach P1 i P3



Rys.5.5. Zależność pomiędzy ekspozycyjnymi poziomami hałasu w punktach P1 i P5



Rys.5.6. Zależność pomiędzy ekspozycyjnymi poziomami hałasu w punktach P2 i P4

Średnioroczną wartość ekspozycyjnego poziomu hałasu w punkcie P3 obliczono korzystając ze wzoru,

$$\tilde{L}_{AE}^{(P3)} = 0.8 \cdot \tilde{L}_{AE}^{(P1)} + 10.8. \quad (5.1)$$

Wartość w punkcie P4, obliczono z zależności,

$$\tilde{L}_{AE}^{(P4)} = 0.8 \cdot \tilde{L}_{AE}^{(P2)} + 15.6, \quad (5.2)$$

zaś w punkcie P5 korzystając ze wzoru,

$$\tilde{L}_{AE}^{(P5)} = 0.9 \cdot \tilde{L}_{AE}^{(P1)} + 10.7. \quad (5.3)$$

Na ich podstawie określono wskaźniki L_{DWN} oraz L_N w punktach pomiarowych P3 – P5. Otrzymane wyniki obliczeń przedstawia tab.5.4. Dodatkowo dla punktów P3 – P5 podano wartości obliczone w programie INM. Jak widać nie różnią się one znacząco, dlatego wartości otrzymane przez przybliżenia (5.1) - (5.3), można uznać za rzeczywiste wartości średnioroczne.

Tab.5.4. Wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu oraz wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w wybranych do analiz punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy	$\tilde{L}_{AE,D}$ [dB]	$\tilde{L}_{AE,W}$ [dB]	$\tilde{L}_{AE,N}$ [dB]	L_{DWN} [dB]	L_N [dB]
P1	94.3	94.9	95.4	64.2	55.6
P2	86.8	87.3	87.6	56.6	49.0
P3	90.0	90.5	91.0	59.9 (60.0)*	51.2 (51.0)*
P4	85.9	86.3	86.6	55.7 (55.2)*	48.0 (47.5)*
P5	91.8	92.3	92.8	61.7 (61.5)*	53.0 (52.7)*

* wartości obliczone w programie INM

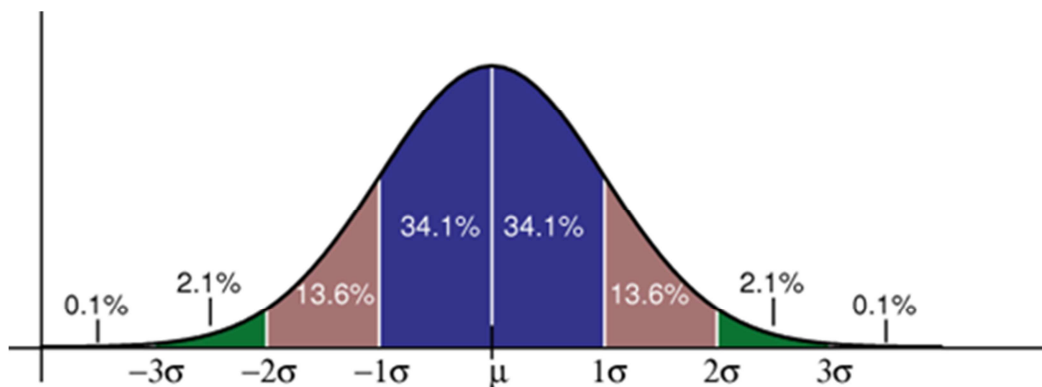
Z wartościami przedstawionymi w tab.5.4 porównywane będą wyniki otrzymywane w eksperymentach, które opisane są w rozdziałach 7, 9, oraz 11. Celem eksperymentów będzie pokazanie jak wykonywać pomiary wartości L_{AE} aby estymowane wskaźniki długookresowe różniły się o mniej niż 1.5 dB od wartości rzeczywistych. W eksperymentach podana zostanie minimalna moc zbioru wartości L_{AE} spełniająca to założenie. Wskazane zostaną również wytyczne co do wyboru wartości L_{AE} oraz okresu i częstotliwości wykonywania ich pomiarów. Wypracowane rozwiązania stanowić będą metodę estymacji wskaźników długookresowych poprzez wykonanie pomiarów krótkotrwałych.

6. Metody oceny estymacji

W kolejnych rozdziałach pracy (7, 9, 11) przedstawiono wyniki eksperymentów komputerowych, których celem była odpowiedź na pytanie: jaki zbiór wartości L_{AE} należy przygotować aby precyzyjnie określić wskaźniki długookresowe. Eksperymenty te polegały na l -krotnym losowaniu n -elementowych podzbiorów wartości L_{AE} z całej populacji (punkty P1 oraz P2). W oparciu o te podzbiory wyliczane zostały wartości średnie $\hat{L}_{AE,D}$, $\hat{L}_{AE,W}$, $\hat{L}_{AE,N}$ (3.8). Następnie na podstawie wzorów (3.9) oraz (2.13) obliczano przybliżone wartości wskaźników długookresowych dla każdego z losowań. Zbiór l wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N pozwolił wykreślić ich funkcję gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuantę. Na podstawie tych funkcji możliwa była ocena dokładności estymacji. Określenie dokładności estymacji można także wykonać poprzez obliczanie momentów statystycznych pierwszego oraz drugiego rzędu, tak jak to zrobiono w pracy [35]. Nie zawsze jednak wnioskowanie na ich podstawie jest satysfakcjonujące. Poniżej przedstawiono dwa podejścia oceniające dokładność estymacji. Pierwsze z nich to właśnie podejście „klasyczne” oparte o wartość średnią i odchylenie standardowe. Drugie zaś bazuje na funkcji gęstości prawdopodobieństwa.

6.1. Klasyczna ocena estymacji

Gdy zmienna losowa ma rozkład normalny, to wówczas można powiedzieć, że z prawdopodobieństwem 95% wartość oczekiwana znajduje się w przedziale określonym przez wartość średnią pomniejszoną o 1.96 odchylenia standardowego oraz wartość średnią powiększoną o 1.96 odchylenia standardowego (rys.6.1).



Rys.6.1. Rozkład normalny z zaznaczonymi przedziałami prawdopodobieństwa (źródło: <http://www.cs.princeton.edu/introcs/11gaussian/>).

Zasadę tę można wykorzystać również do oceny estymacji wskaźników długookresowych. Jeżeli dla l wartości zbioru \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N , obliczanych na podstawie l losowań n wartości L_{AE} obliczymy wartość średnią zgodnie ze wzorem

$$\bar{L}_{DWN} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \hat{L}_{DWN}^{(i)}, \quad (6.1)$$

gdzie $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$ oznacza wartość obliczoną dla i -tego losowania, a następnie odchylenie standardowe

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{l \cdot (l-1)} \sum_{i=1}^l (\hat{L}_{DWN}^{(i)} - \bar{L}_{DWN})^2}, \quad (6.2)$$

to wartość oczekiwana L_{DWN} będzie znajdować się z 95% prawdopodobieństwem w przedziale

$$\bar{L}_{DWN} - 1.96 \cdot \sigma \leq L_{DWN} \leq \bar{L}_{DWN} + 1.96 \cdot \sigma. \quad (6.3)$$

Tego typu zależność określa 95% przedział prawdopodobieństwa wyłącznie gdy dane, czyli w tym wypadku wartości $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$ mają rozkład normalny. W niniejszej pracy poszukiwana jest metoda estymacji wartości $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$ w taki sposób aby ich rozrzut przedstawiony nierównością (6.3) był możliwie najmniejszy. W symulacjach założono, że rozpiętość tego przedziału nie powinna przekraczać 3 dB.

6.2. Ocena estymacji w oparciu o estymator jądrowy gęstości

W przypadku kiedy zmienna losowa ma rozkład różniący się kształtem od normalnego, określanie przedziału wartości który daje wynik z zadanyim prawdopodobieństwem jest możliwe tylko gdy znana jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa badanej zmiennej. Jeżeli znamy postać parametryczną funkcji gęstości prawdopodobieństwa obliczenie wartości dolnej i górnej przedziału dającej 95% prawdopodobieństwo sprowadza się do jej scałkowania w określonych granicach. Niekiedy nieznana jest matematyczna postać tejże funkcji. Wtedy można skorzystać z jądrowego estymatora funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Jest to rodzaj estymatora nieparametrycznego, za pomocą którego można wyznaczyć rozkład zmiennej losowej na

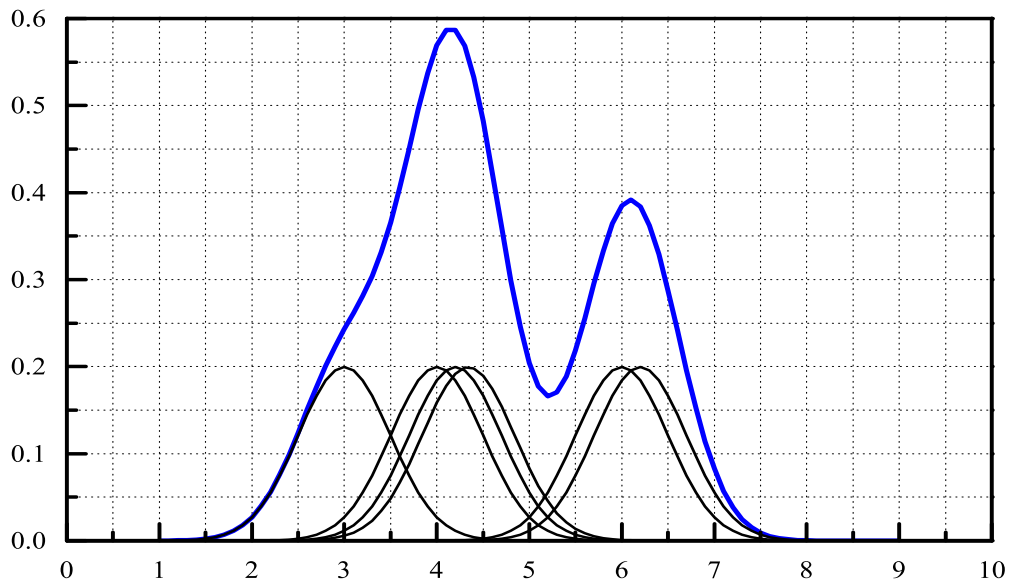
podstawie uzyskanej próby. Metoda wyznaczania funkcji gęstości prawdopodobieństwa w oparciu o ten estymator polega na złożeniu funkcji gęstości prawdopodobieństwa z wielu tych samych funkcji (jąder) o znanym, przyjętym arbitralnie kształcie [50]:

$$f(x) = \frac{1}{mh^n} \sum_{i=1}^m K\left(\frac{x-x_i}{h}\right), \quad (6.4)$$

gdzie:

- m – liczba elementów próby losowej,
- x_i – i -ty element próby,
- h – parametr wygładzania,
- n – liczba wymiarów zmiennej losowej,
- K – funkcja jądra.

Jądra mają różnego rodzaju kształty. Mogą być prostokątne, trójkątne, ale również dane funkcjami Gaussa. Przykład estymacji funkcji gęstości prawdopodobieństwa z wyróżnieniem elementów składowych, przedstawia rys.6.2.



Rys.6.2. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa uzyskana za pomocą jądrowego estymatora funkcji gęstości

Mając wyznaczoną nieparametrycznie funkcję gęstości prawdopodobieństwa możliwe jest określenie przedziału, w którym z zadanim prawdopodobieństwem znajduje się wartość poszukiwana. Wartości górnej i dolnej granicy przedziału można obliczyć przez

całkowanie dla dowolnego zakładanego prawdopodobieństwa. Aby otrzymać dolną wartość przedziału należy scałkować otrzymaną funkcję gęstości prawdopodobieństwa zgodnie ze wzorem

$$\int_{-\infty}^{x_1} f(x) \cdot x dx = \frac{1}{2}(1-p). \quad (6.5)$$

Poszukiwana wartość x_1 oznacza dolną granicę przedziału zaś p prawdopodobieństwo wystąpienia wartości oczekiwanej w przedziale domkniętym przez wartość x_1 . Analogicznie można postąpić w przypadku obliczania górnej wartości przedziału, x_2 ,

$$\int_{-\infty}^{x_2} f(x) \cdot x dx = \frac{1}{2}(1+p). \quad (6.6)$$

Wartość średnią oblicza się ze wzoru

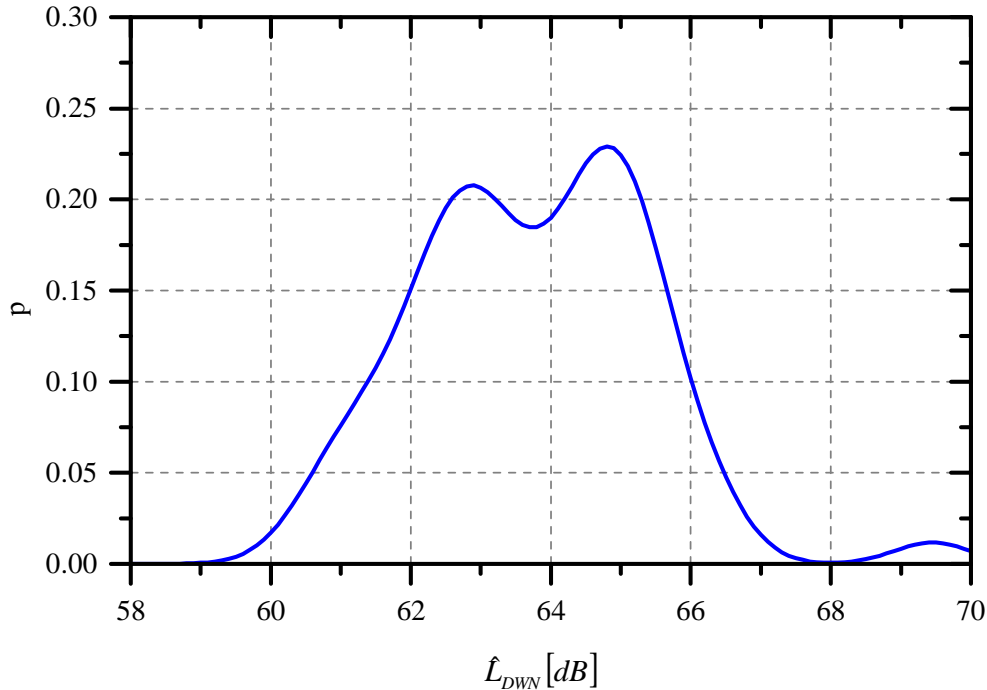
$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot x dx. \quad (6.7)$$

Adaptując powyższą metodę opisaną wzorami (6.5) - (6.7) do danych uzyskiwanych podczas eksperymentów komputerowych wartości x zastępujemy przez $\hat{L}_{DWN}^{(i)}$ oraz $\hat{L}_N^{(i)}$ zaś funkcję $f(x)$ przez funkcje $f(\hat{L}_{DWN}^{(i)})$ oraz $f(\hat{L}_N^{(i)})$. Analogicznie postępujemy w przypadku wartości średnich $\bar{x} = \bar{L}_{DWN}$ oraz $\bar{x} = \bar{L}_N$. Po takim podstawieniu wartości otrzymane na podstawie rozwiązania numerycznego równań (6.5) oraz (6.6) określają dolną i górną granicę przedziału odpowiednio $x_1 = L_{DWN}^{(d)}$, $x_2 = L_{DWN}^{(g)}$ oraz $x_1 = L_N^{(d)}$, $x_2 = L_N^{(g)}$.

6.3. Wybór metody

Próbne losowania i obliczenia pokazały, że dla danych wykorzystywanych w niniejszej pracy nie zawsze możliwe jest zastosowanie, przedstawionego w rozdziale 6.1, klasycznego podejścia do oceny estymacji. W niektórych przypadkach otrzymywane funkcje gęstości prawdopodobieństwa dla losowanych wartości znacząco odbiegały kształtem od rozkładu normalnego (rys.6.3). Testy Lilieforse'a określające normalność rozkładu [51] oraz testy oparte o ocenę wartości skośności i kurtozy [52], również

wskazywały na to, że otrzymywany rozkład statystycznie różni się od rozkładu normalnego. Zastosowanie metody oceny estymacji przedstawionej w rozdziale 6.1 owszem jest możliwe, jednak wnioskowanie, iż oczekiwany wynik znajduje się w przedziale z 95% prawdopodobieństwem, już nie.



Rys.6.3. Rozkład wartości \hat{L}_{DWN} dla $k = 500$ losowań

Ze względu na to, że każdorazowe losowanie dawało inny kształt rozkładu, niemożliwe było zastosowanie znanych, opisanych analitycznie funkcji gęstości prawdopodobieństwa. W dalszych analizach postanowiono wykorzystać metodę opisaną w rozdziale 6.2 bazującą na jądrowym estymatorze funkcji gęstości prawdopodobieństwa. W pracy do estymacji wykorzystywano funkcję *ksdensity* dostępną w programie Matlab. Wszystkie funkcje gęstości prawdopodobieństwa określone były z wykorzystaniem jądra o kształcie gaussowskim ze współczynnikiem wygładzania $h = 0.75$. Następnie dokonywano ich numerycznego całkowania (wzory (6.5), (6.6)), które pozwalało określać dolne $L_{DWN}^{(d)}$, $L_N^{(d)}$ i górne $L_{DWN}^{(g)}$, $L_N^{(g)}$ granice przedziału, w którym z 95-cio procentowym prawdopodobieństwem znajdowały się wartości średnie \bar{L}_{DWN} oraz \bar{L}_N .

7. Eksperyment I – losowanie dowolnych wartości L_{AE}

Jednym z celów niniejszej pracy jest określenie zawartości oraz liczebności zbioru wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu, L_{AE} , potrzebnych do estymacji wskaźników długookresowych. Wartości estymowane nie powinny się różnić o więcej niż 1.5 dB od wartości rzeczywistej, a moc zbioru powinna być wielokrotnie mniejsza, $n \ll N$, aniżeli liczebność populacji L_{AE} . Ostatnie założenie pozwoli skrócić czas pomiarów do kilku dni w ciągu roku. W celu wyznaczenia liczebności zbioru przeprowadzono trzy eksperymenty numeryczne. Każdy z nich polegał na l -krotnym losowaniu zbioru o małej liczebności wartości L_{AE} , a następnie obliczaniu na ich podstawie l wartości wskaźników długookresowych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . Zbiór obliczonych wskaźników podlegał ocenie statystycznej, polegającej na wyznaczeniu funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty. Dla tego zbioru obliczano również wartość średnią oraz dolną i górną granicę, zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.2, która określała 95% przedział prawdopodobieństwa występowania wartości oczekiwanej. W zależności od eksperymentu różny był sposób oraz liczba losowanych wartości. Wszystkie eksperymenty zaimplementowane zostały w środowisku programistycznym MatLab.

7.1. Charakterystyka eksperymentu

Celem eksperymentu pierwszego było wyznaczenie zależności rozrzutu estymowanych wskaźników długookresowych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N od liczby wylosowanych n wartości L_{AE} . W tym celu, l -krotnie z jednakowym prawdopodobieństwem losowano dzień oraz godzinę rozpoczęcia pomiarów. Następnie, dla każdego losowania, z całorocznego zbioru danych pomiarowych wybierano n kolejnych wartości L_{AE} rejestrowanych w danym punkcie pomiarowym, począwszy od wylosowanej godziny danej doby. Na podstawie tego podzbioru obliczano wartość średnią \hat{L}_{AE} . Korzystając ze wzorów (3.9) oraz (2.13) obliczano wartości wskaźników długookresowych. Liczbę operacji $\tilde{N}_D, \tilde{N}_W, \tilde{N}_N$ którą przyjmowano do obliczeń wskaźników zestawiono w tab.7.1.

Tab.7.1. Średnia dobowa liczba operacji lotniczych w roku 2012 na lotnisku Poznań-Ławica, wykorzystywana do obliczeń wskaźników długookresowych

Pora doby	Liczba operacji dla punktów	
	zlokalizowanych na zachód od ARP	zlokalizowanych na wschód od ARP
Dzień	$\tilde{N}_D = 21$	$\tilde{N}_D = 17$
Wieczór	$\tilde{N}_W = 7$	$\tilde{N}_W = 5$
Noc	$\tilde{N}_N = 3$	$\tilde{N}_N = 4$

Podczas losowania wartości L_{AE} nie zastosowano podziału danych na pory dnia. Oznacza to, że przy obliczaniu wskaźników \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N założono, że $\hat{L}_{AE,D} = \hat{L}_{AE,W} = \hat{L}_{AE,N} = \hat{L}_{AE}$. Takie założenie pozwala docelowo znacznie skrócić okres wykonywania pomiarów. Nie trzeba wówczas mierzyć wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu dla poszczególnych pór doby. Tego rodzaju uproszczenie nie wpływa także znacząco na wynik końcowy, co zaprezentowano w tab.7.2.

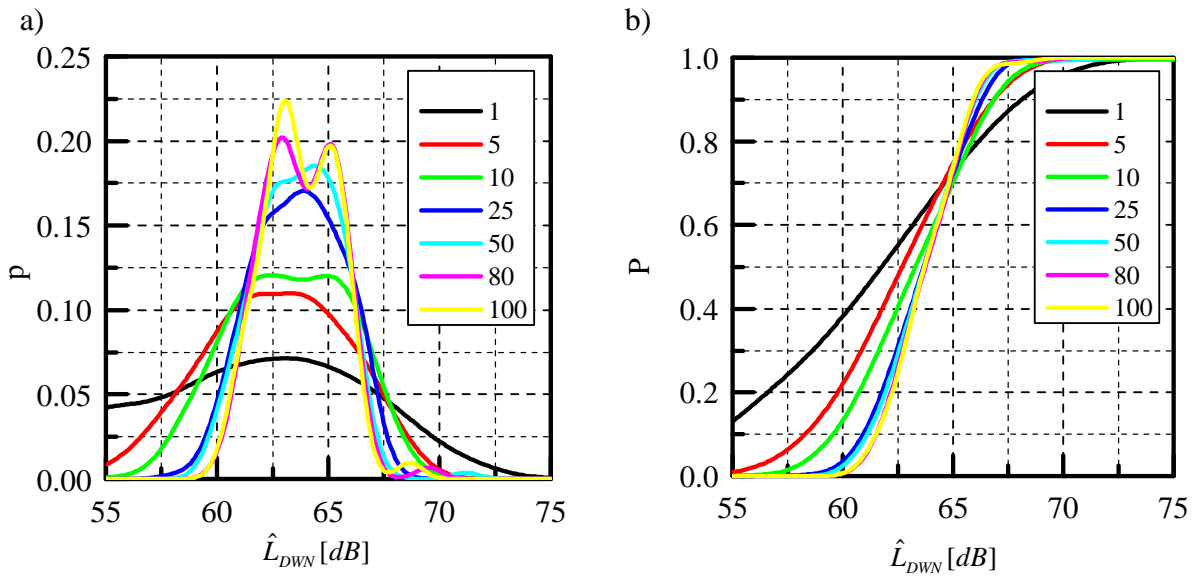
Tab.7.2. Wartości wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w punktach P1 i P2 obliczane z podziałem oraz bez podziału wartości \tilde{L}_{AE} na pory doby

Punkt pomiarowy	Wartości obliczone bez podziału wartości \tilde{L}_{AE} na pory doby		Wartości obliczone z podziałem wartości \tilde{L}_{AE} na pory doby	
	L_{DWN} [dB]	L_N [dB]	L_{DWN} [dB]	L_N [dB]
P1	64.2	55.2	64.2	55.6
P2	56.1	48.2	56.6	49.0

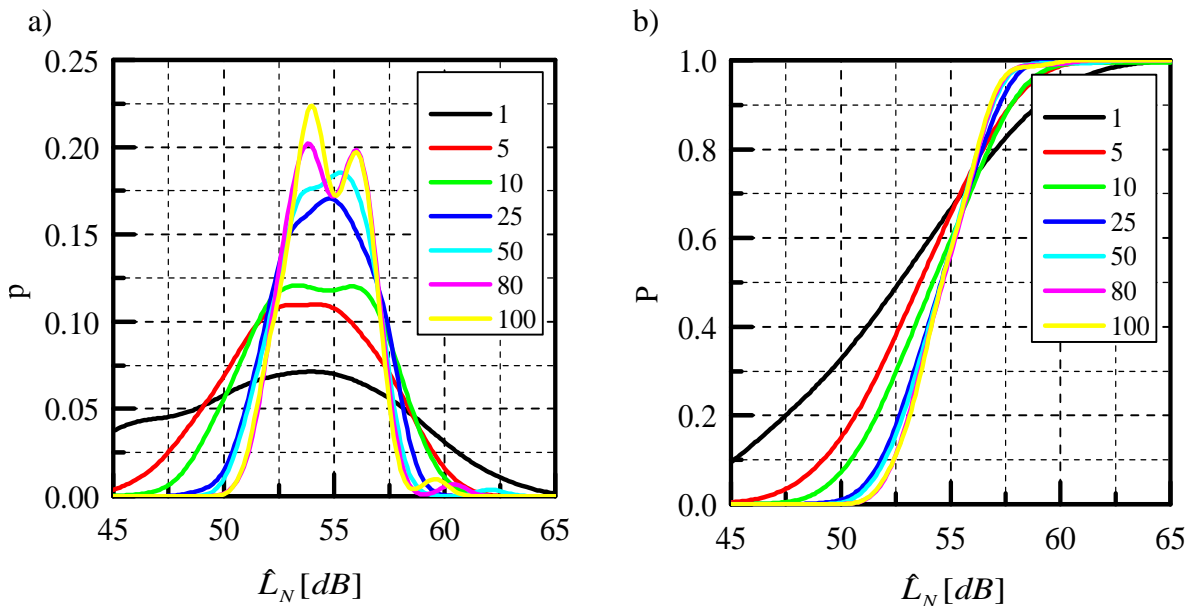
Możliwość wielokrotnego losowania umożliwiła sprawdzenie, jaki jest rozrzut wartości estymowanych wskaźników długookresowych. Jest to istotne z tego względu, że pozwala ocenić jak zmienia się wartość estymowana w zależności od tego kiedy pomiary są wykonywane. W ramach eksperymentu sprawdzano również, wpływ zmiany n na rozrzut estymowanej wartości. W niniejszym eksperymencie wykonywano $l = 500$ losowań dla każdej wartości n . Taka liczba losowań, wykonywana z równomiernym prawdopodobieństwem wystąpienia danej daty, gwarantuje, że symulacje dotyczą każdej doby w roku. Wartości n zmieniano z krokiem $\Delta n = 1$. Eksperyment przeprowadzono dla danych z punktów pomiarowych P1 oraz P2.

7.2. Wyniki eksperymentu

Dla każdego $l = 500$ -elementowego zbioru wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N wykreślano funkcję gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuantę. Na ich podstawie, zgodnie z metodą przedstawioną w rozdziale 6.2, obliczano wartości \bar{L}_{DWN} i \bar{L}_N oraz granice przedziałów $L_{DWN}^{(d)}$, $L_{DWN}^{(g)}$ oraz $L_N^{(d)}$, $L_N^{(g)}$. Przykładowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty przedstawiono na rys.7.1 – 7.4, wyniki obliczeń odpowiadające tym funkcjom w tab.7.3 oraz 7.4.



Rys.7.1. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P1, $l = 500$, $n = 1, 5, 10, 25, 50, 80, 100$, wskaźnik L_{DWN}

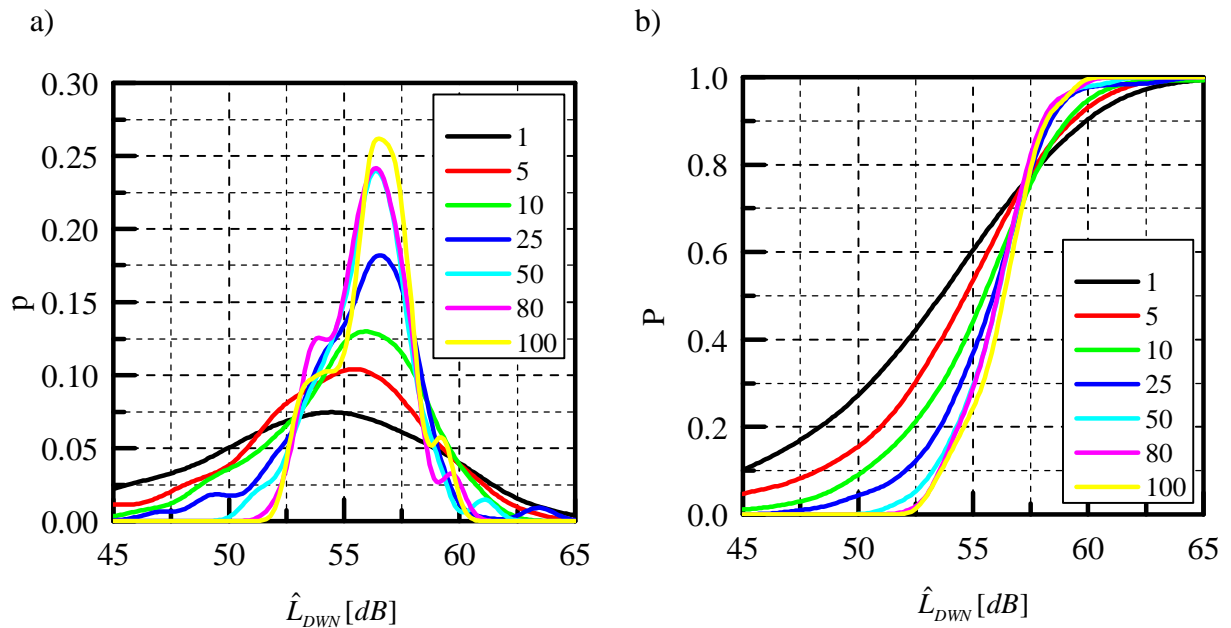


Rys.7.2. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P1, $l = 500$, $n = 1, 5, 10, 25, 50, 80, 100$, wskaźnik L_N

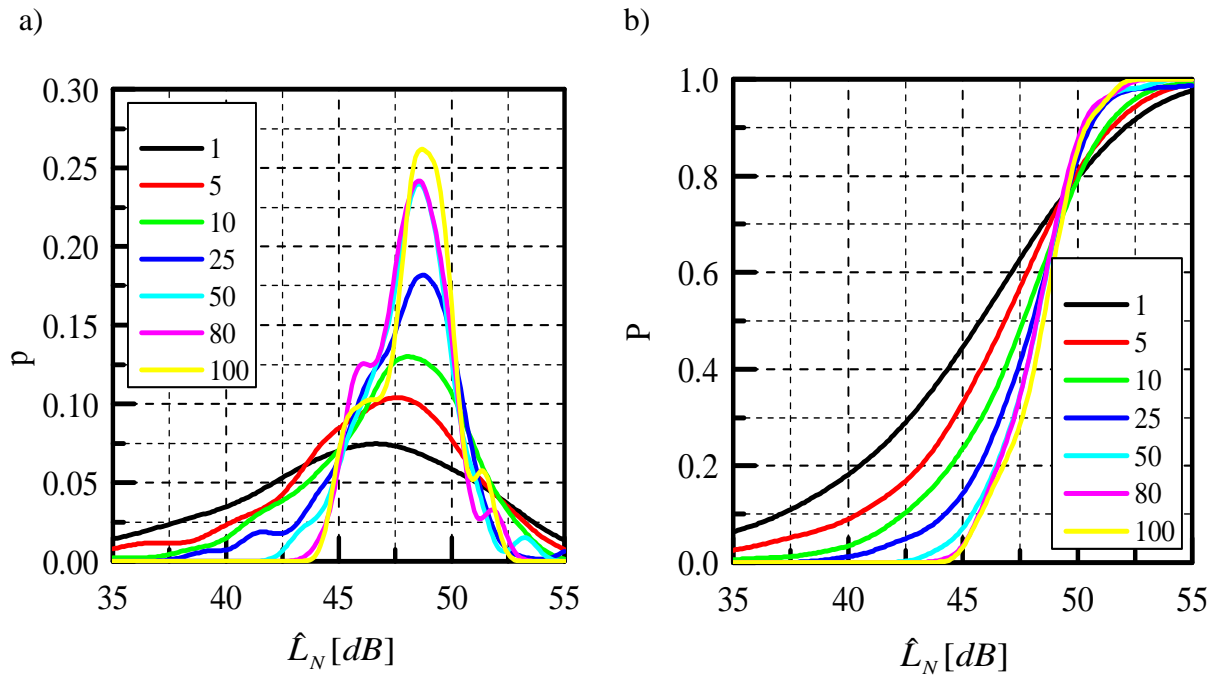
W tab.7.3 i 7.4 przedstawiono wartości średnie \bar{L}_{DWN} , \bar{L}_N , które mówią jaka była przeciętna wartość estymowanych poziomów \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N w trakcie symulacji. W kolumnach oznaczonych przez $L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ oraz $L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ przedstawiono różnicę pomiędzy górną wartością przedziału określającego wystąpienie wyniku z $p=0.95$ a wartością średnią, a w kolumnach $\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ i $\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ różnicę pomiędzy wartością średnią a dolną granicą tego przedziału.

Tab.7.3. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , liczba losowań $l = 500$

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
1	61.5	9.5	9.7	52.4	9.5	9.7
5	62.6	6.0	6.4	53.5	6.0	6.4
10	63.3	5.1	5.3	54.2	5.1	5.3
25	63.6	3.7	3.9	54.5	3.7	3.9
50	63.6	3.3	3.6	54.5	3.3	3.6
80	63.8	3.1	3.1	54.7	3.1	3.1
100	63.8	3.1	3.2	54.7	3.1	3.2



Rys.7.3. Funkcja gęstości prawdopodobieństw (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P2, $l = 500$, $n = 1, 5, 10, 25, 50, 80, 100$, wskaźnik L_{DWN}



Rys.7.4. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P2, $l = 500$, $n = 1, 5, 10, 25, 50, 80, 100$, wskaźnik L_N

Tab.7.4. Wyniki symulacji w punkcie P2 dla różnych wartości n , liczba losowań $k = 500$

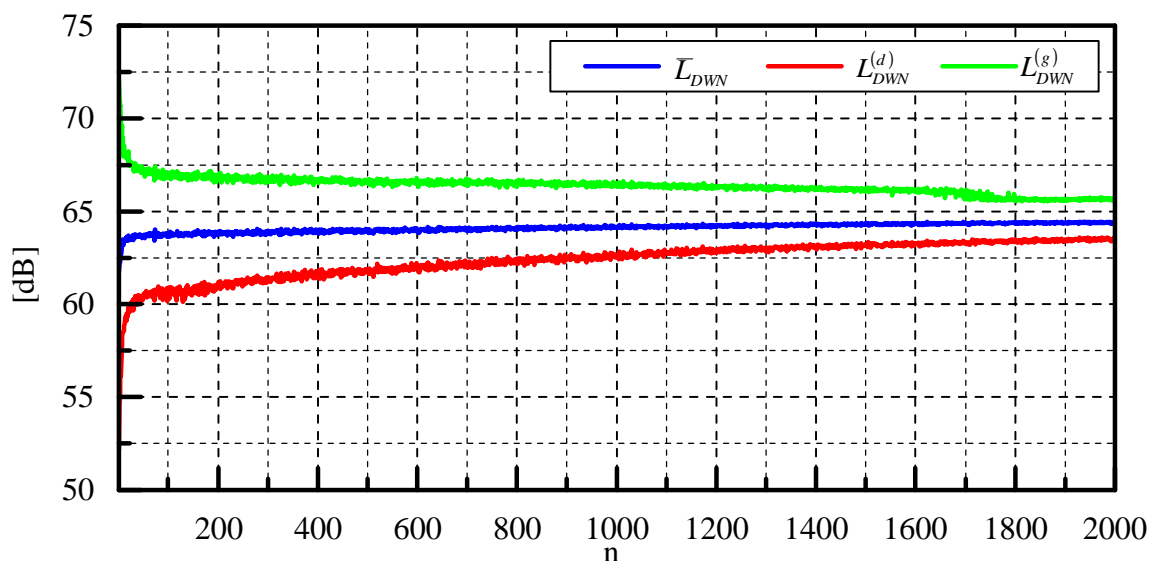
n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
1	52.9	9.9	13.6	45.1	10.0	13.6
5	54.1	7.5	11.2	46.3	7.5	11.2
10	55.1	5.9	8.0	47.2	6.0	8.0
25	55.5	4.4	6.5	47.7	4.4	6.5
50	55.9	3.7	4.2	48.1	3.7	4.2
80	55.9	3.6	3.3	48.1	3.6	3.3
100	56.2	3.3	3.4	48.3	3.3	3.4

Przedstawione w tab.7.3 i 7.4 wartości przeciętne \bar{L}_{DWN} , \bar{L}_N dla prób składających się z 80 – 100 elementów nie różnią się od tych rzeczywistych podanych w tab.5.4 o więcej niż 1 dB. Jest to wynik zadowalający. Niestety nie można tego powiedzieć o rozrzucie wyników uzyskiwanych w poszczególnych losowaniach. Jak widać na rys.7.1 – 7.4 oraz w tab.7.3 i 7.4, różnica pomiędzy wartością średnią i dolną granicą zakładanego przedziału oraz różnica pomiędzy wartością górną zakładanego przedziału i wartością średnią jest dużo większa niż 1.5 dB. Rozbieżność z założeniem jest bardzo duża zwłaszcza, gdy do obliczeń wybieramy próbę z małym n . Próby rzędu 80 - 100 elementów

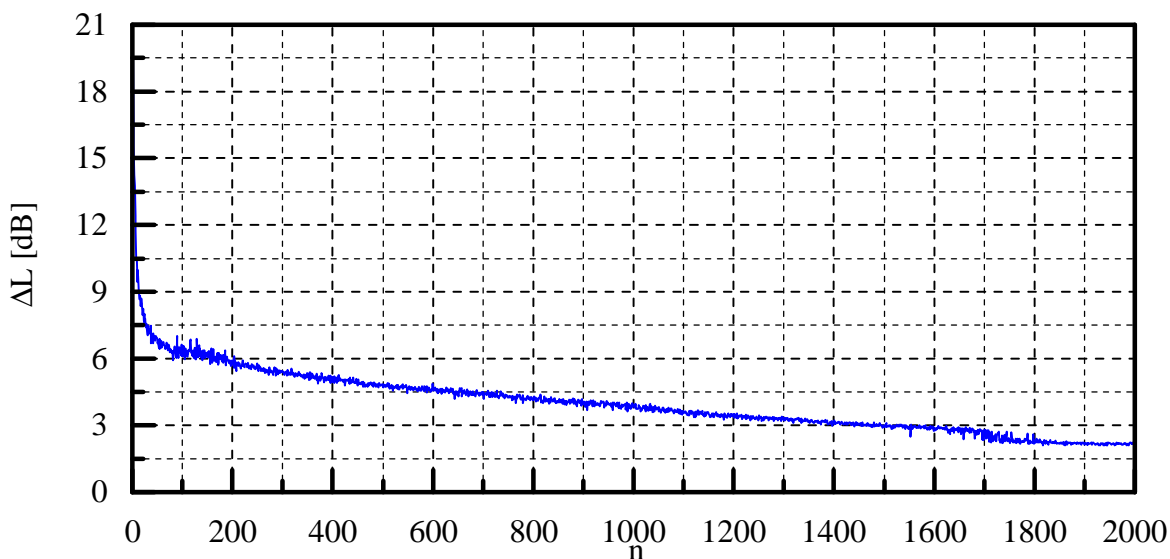
dają rozrzut wskaźników długookresowych większy niż 6 dB. W pracy założono, że rozrzut na poziomie ≤ 3 dB będzie uznany za zadowalający. Zwiększanie liczby n powoduje zmniejszanie się rozrzutu ΔL , zdefiniowanego jako

$$\Delta L = L_{DWN}^{(g)} - L_{DWN}^{(d)}, \text{ lub } \Delta L = L_N^{(g)} - L_N^{(d)}. \quad (7.1)$$

Osiągnięcie założonej rozpiętości wyników rzędu 3 dB możliwe jest dopiero możliwe przy relatywnie dużej mocy zbioru wartości L_{AE} - około 1400. Widać to na rysunkach 7.5 oraz 7.6.



Rys.7.5. Zależność pomiedzy \bar{L}_{DWN} , $L_{DWN}^{(g)}$ oraz $L_{DWN}^{(d)}$ a liczba pomiarow n – (punkt P1).

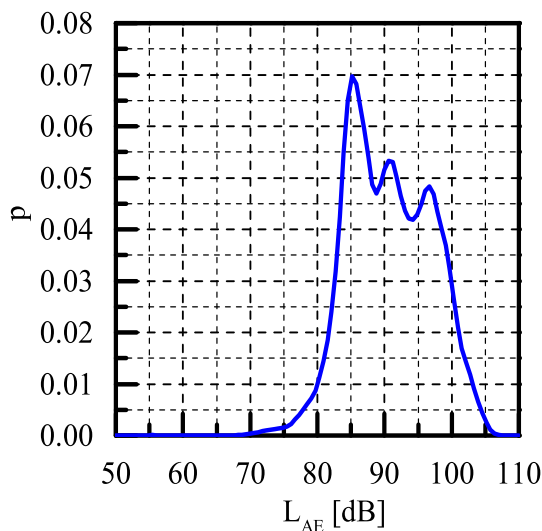


Rys.7.6. Zależność pomiedzy ΔL , a liczba pomiarow n – (punkt P1).

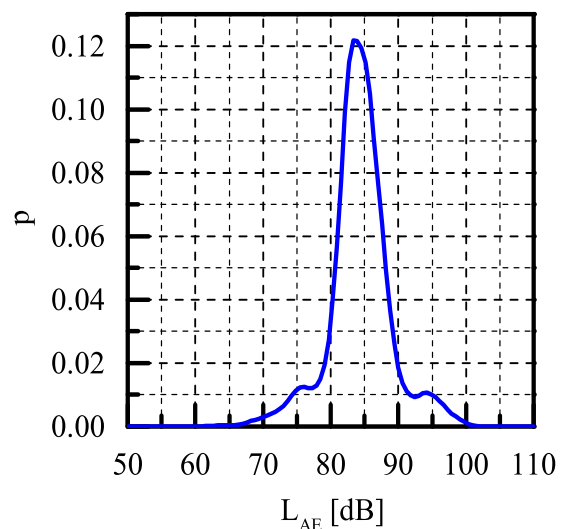
Wynik ten dotyczy wartości uzyskiwanych punktach P1 oraz P2 również dla wskaźników hałasu dla pory nocnej. W praktyce, wykonanie pomiaru kilkuset wartości L_{AE} zajęłoby, w zależności od lotniska, od kilku dni do miesiąca, w zależności od okresu w roku, co nie jest wynikiem wykluczającym. Z punktu widzenia potrzeby relatywnie szybkiej kontroli hałasu jest to jednak wynik niezadowolający. W celu poprawienia wyników estymacji konieczne jest znalezienie innej metodyki wykonywania pomiarów, który pozwoli zmniejszyć rozrzut ΔL . Przyczyną dużych rozrzutów wartości przy relatywnie małych próbach ($n = 80 - 100$) może być niereprezentatywny w odniesieniu do skali roku zbiór losowanych wartości. Losowania obejmują operacje różnego typu (starty i lądowania) różnych statków powietrznych. Udział poszczególnych z nich, w danej próbie powinien być zbliżony do tego dla całej populacji. Tylko wtedy jest szansa, że otrzymywany rozrzut ΔL dla małych prób będzie mniejszy.

8. Kategoryzacja operacji lotniczych

Obserwacje poczynione w rozdziale 7.2 wskazują na to, że przyczyną dużych rozrzutów estymacji wskaźników długookresowych może być niejednorodność zbioru wskaźników krótkookresowych. Zauważono, że przyczyną takich rozbieżności może być procentowy udział operacji lotniczych różnego typu w losowanym zbiorze, jak również procentowy udział różnych typów statków powietrznych. Chcąc zbadać czy tak właśnie jest, należy zbadać rozkłady statystyczne wartości L_{AE} dla całej populacji. Na rys.8.1 i 8.2 przedstawiono funkcje gęstości prawdopodobieństwa wyznaczone dla wszystkich zarejestrowanych w roku 2012 operacji lotniczych w punktach P1 oraz P2 .



Rys.8.1. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa, L_{AE} w punkcie P1 dla roku 2012



Rys.8.2. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa, L_{AE} w punkcie P2 dla roku 2012

Podobnie jak to miało miejsce w przypadku poprzednich analiz, do wykreślenia funkcji gęstości prawdopodobieństwa wykorzystano tylko te wartości, które dotyczyły operacji lotniczych wykonywanych nad danym punktem pomiarowym. Ze zbioru danych wyeliminowano poziomy rejestrowane gdy lądujący statek powietrzny korzystał z odwracacza ciągu (rozdział 5.1). Krzywa uzyskana w punkcie P1 charakteryzuje się kilkoma wyraźnymi maksimumami, co sugeruje występowanie pewnych podgrup (podzbiorów) o zbliżonych do siebie wartościach ekspozycyjnego poziomu hałasu. W przypadku krzywej wykreślonej dla punktu P2, maksima boczne istnieją, choć są mniej wyraźne. Ten fakt potwierdza wcześniejsze przypuszczenia o niejednorodności zbioru

wartości L_{AE} . Podobny kształt histogramów otrzymano w pracy [46] oraz w pracach dotyczących hałasu drogowego[39][41]. Co prawda dotyczyły one innych wskaźników oceny hałasu, jednak w ich przypadku możliwe było wskazanie przyczyn występowania maksimum. Kolejnym etapem pracy będzie zatem zbadanie, co wpływa na kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa ekspozycyjnych poziomów hałasu, L_{AE} .

8.1. Kategoryzacja ze względu na rodzaj operacji lotniczej

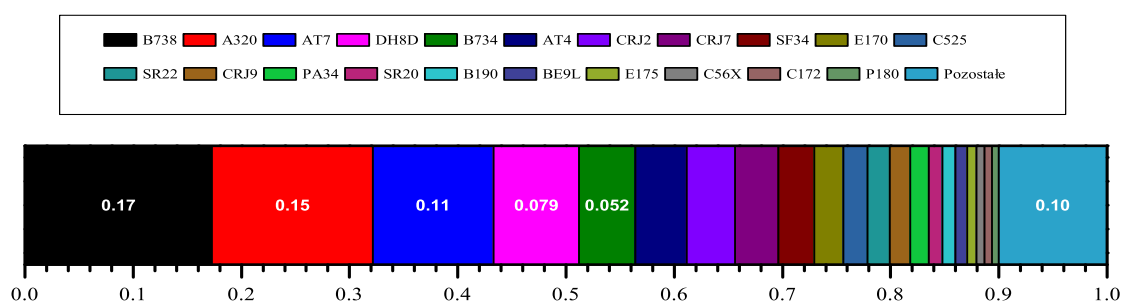
W tab. 8.1 zebrano średnie wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu dla 90% statków powietrznych zarejestrowanych na lotnisku testowym. Statki te należały do 21 różnych typów. Pozostałe 10% to typy samolotów, które sporadycznie występowały podczas pomiarów. Ich zróżnicowanie było bardzo duże, jednak ze względu na małą liczebność poszczególnych rodzajów, wyłączono je z analiz. Szczegółowy rozkład procentowy typów samolotów przedstawiono na rys.8.3.

Tab.8.1. Średnie poziomy ekspozycyjne hałasu operacji startu i lądowania dla poszczególnych statków powietrznych

Typ statku ¹³	Punkt P1		Punkt P2	
	Start 28	Lądowanie 10	Start 10	Lądowanie 28
B738	98.9	93.2	95.3	87.1
A320	96.6	90.5	93.9	85.5
AT7	86.4	91.3	84.1	85.4
DH8D	84.4	89.2	82.6	82.6
B734	101.5	94.7	97.6	88.3
AT4	85.5	90.7	83.5	84.7
CRJ2	88.2	88.6	84.2	82.8
CRJ7	92.1	88.0	89.3	83.2
SF34	85.8	90.6	82.2	85.2
E170	94.1	89.6	92.1	83.5
C525	91.4	87.6	89.0	81.2
SR22	86.2	81.0	83.5	77.8

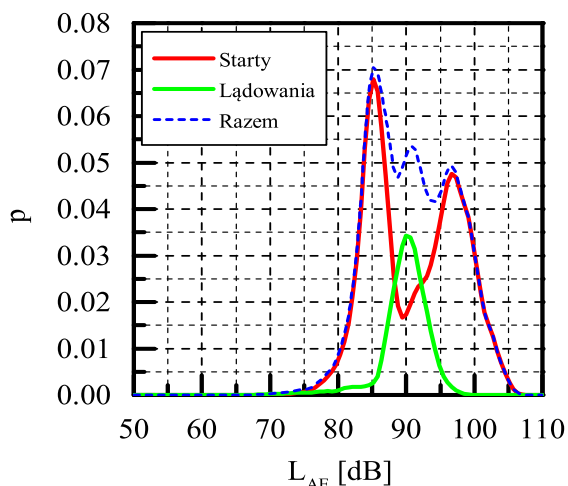
¹³ Nazwy skrócone statków zgodne ICAO (International Civil Aviation Organization) [53] – szczegółowy opis nazw w załączniku 1

Typ statku ¹³	Punkt P1		Punkt P2	
	Start 28	Lądowanie 10	Start 10	Lądowanie 28
CRJ9	92.7	88.2	89.5	83.3
PA34	84.6	87.0	84.5	80.4
SR20	85.5	76.9	82.5	74.2
B190	84.0	90.6	83.1	85.4
BE9L	83.0	82.3	80.4	79.2
E175	94.0	90.5	92.3	84.0
C56X	86.2	85.8	83.1	80.8
C172	84.5	85.8	83.8	84.9
P180	93.2	97.7	90.0	91.6

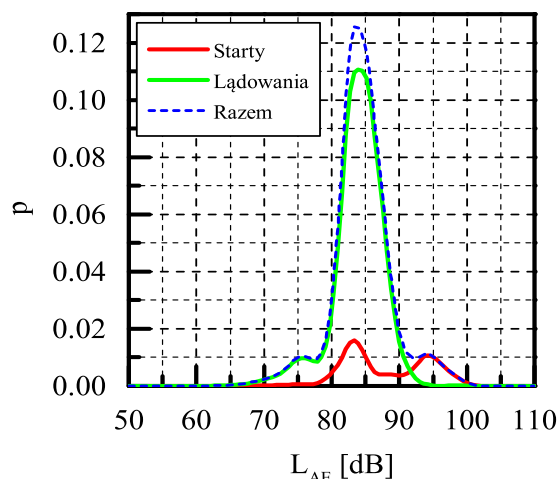


Rys.8.3. Udział procentowy poszczególnych typów samolotów w populacji

Jak wynika z tab.8.1, dla większości typów statków powietrznych średni ekspozycyjny poziom hałasu, L_{AE} , dla operacji startu różni się od tego dla operacji lądowania. Co ciekawe, w przypadku niektórych statków powietrznych operacja startu ma wyższy poziom aniżeli operacja lądowania (B738, A320, CRJ9 etc.). Aby sprawdzić, jak poszczególne rodzaje operacji wpływają na kształt histogramu, zbiór danych podzielono i wykreślono oddzielnie funkcje gęstości prawdopodobieństwa (rys.8.4, 8.5).



Rys.8.4. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa z podziałem na operacje startu i lądowania, L_{AE} w punkcie P1 dla roku 2012

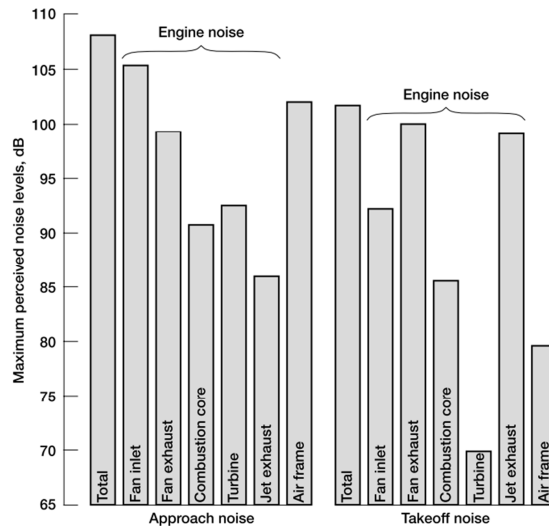


Rys.8.5. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa z podziałem na operacje startu i lądowania, L_{AE} w punkcie P2 dla roku 2012

Na obydwóch rysunkach operacje startu charakteryzuje dwumodalność. Operacje lądowania mają rozkład jednomodalny, zbliżony do rozkładu normalnego. Różnice ilościowe pomiędzy krzywymi dla startów na rys.8.4 oraz 8.5 wynikają z różnego udziału procentowego tych operacji na poszczególnych kierunkach. W punkcie P1 rejestrowano znacznie więcej startów, zaś w punkcie P2 znacznie więcej lądowań (tab.5.3). Jedną z przyczyn grupowania się wartości L_{AE} jest zatem rodzaj operacji lotniczej. W przypadku wykonywania estymacji trzeba zwracać uwagę na procentowy udział operacji branych do obliczeń. Powinien być on zbliżony do tego, jaki występuje dla okresu całego roku. W kolejnym eksperymencie (rozdział 9) zostanie ten fakt uwzględniony. Zanim przejdziemy jednak do kolejnych prób, należy najpierw zastanowić się nad przyczyną dwumodalności operacji startu.

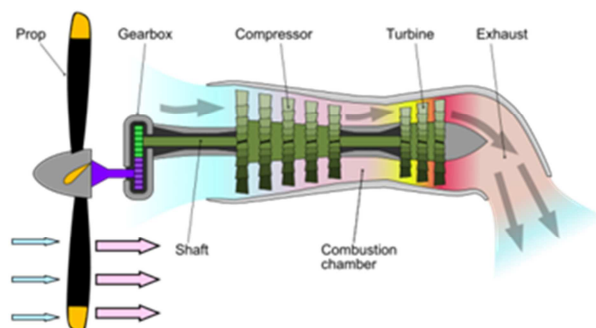
8.2. Kategoryzacja ze względu na typ silnika

Głównym źródłem hałasu w samolotach są ich silniki [56]. Na rys.8.6 przedstawiono wkład poszczególnych elementów samolotu do wypadkowego poziomu hałasu.



Rys.8.6. Wkład poszczególnych źródeł hałasu w samolocie do wypadkowego poziomu hałasu[56].

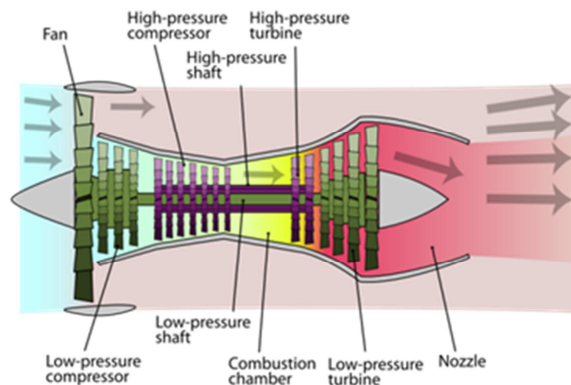
Analizując przedstawione powyżej dane można stwierdzić, że typ używanych silników będzie miał zasadniczy wpływ na poziom hałasu emitowanego do środowiska przez statki powietrzne, zwłaszcza podczas operacji startu. Obecnie w samolotach cywilnych najczęściej spotykane są silniki turbowentylatorowe, turbośmigłowe oraz tłokowe. Te dwa pierwsze stosowane są w jednostkach o dużej masie startowej, tłokowe zaś wykorzystywane są głównie w samolotach sportowych oraz typu General Aviation. Silnik turbośmigłowy to rodzaj napędu, który do napędzania śmigła wykorzystuje turbinę gazową (rys.8.7). Głównym źródłem napędu w tym silniku jest zewnętrzne śmigło i to ono powoduje ruch samolotu. W przypadku silnika tłokowego śmigło jest napędzane przez klasyczny silnik spalinowy.



Rys.8.7. Silnik turbośmigłowy (źródło: http://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik_turbośmigłowy)

Silnik turbowentylatorowy to rodzaj napędu oparty również o turbinę gazową. Źródłem napędu są w nim dwa elementy: wentylator (śmigło o dużej liczbie łopatek) oraz

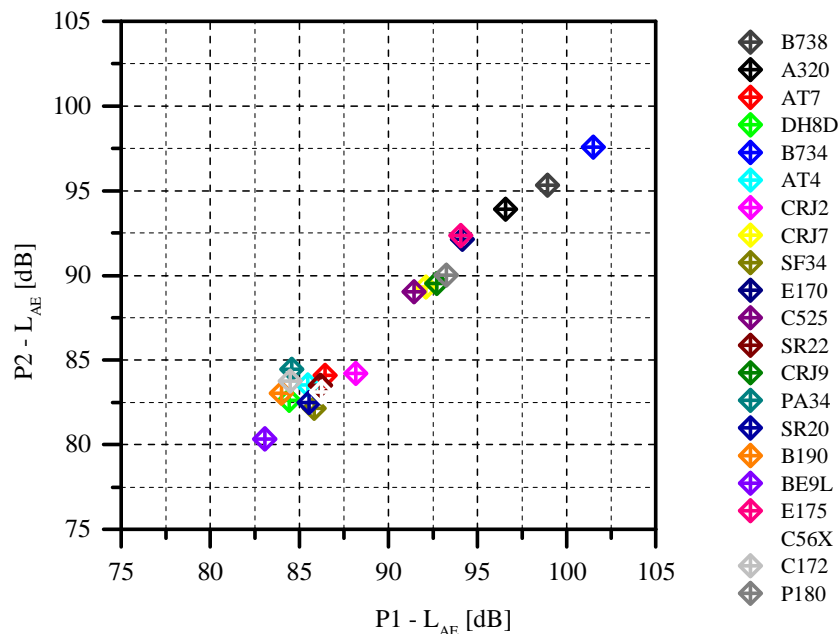
gazy wylotowe z turbiny gazowej. Część powietrza przepływającego przez silnik przechodzi przez komorę spalania druga zaś bezpośrednio przez kanał zewnętrzny silnika (rys.8.8).



Rys.8.8. Silnik turbowentylatorowy

(źródło:http://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik_turbowentylatorowy)

Sprawdzimy zatem, czy rodzaj zastosowanego silnika będzie odpowiedzialny za grupowanie poziomów, dla operacji startów, widoczne na rys.8.4 oraz 8.5. Aby to sprawdzić, sporządzono wykres (rys.8.9) przedstawiający zależność pomiędzy średnim ekspozycyjnym poziomem hałasu w punkcie P1, a średnim ekspozycyjnym poziomem hałasu w punkcie P2, dla startów wybranych 21 statków powietrznych. Wykres wykonano na podstawie danych z tab.8.1.



Rys.8.9. Zależność pomiędzy średnim poziomem ekspozycyjnym hałasu dla poszczególnych statków powietrznych w punkcie P1, a średnim poziomem ekspozycyjnym hałasu w punkcie P2

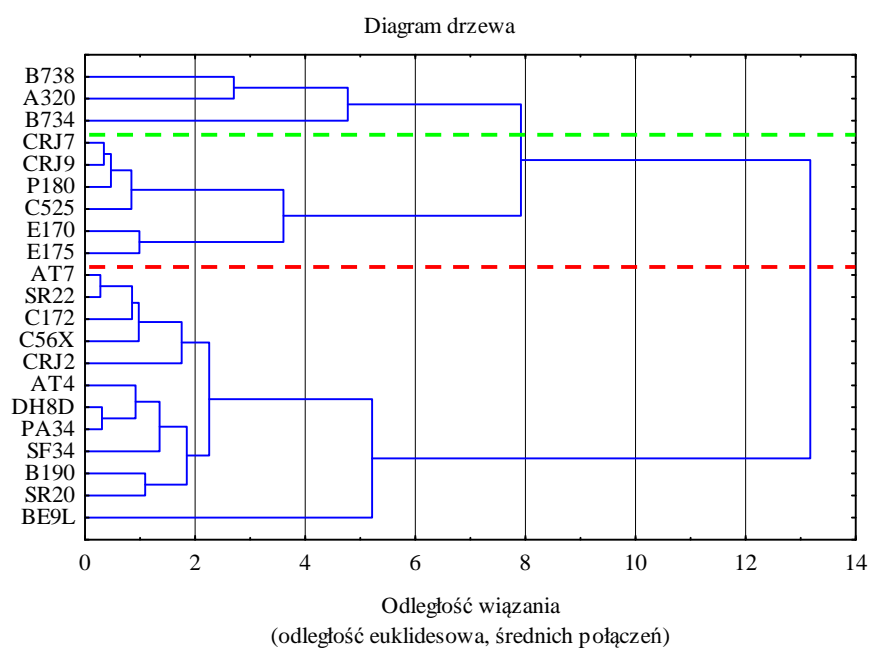
Na wykresie (rys.8.9) występują obszary skupień, o zbliżonych poziomach ekspozycyjnych dla operacji startu. Dotyczy to np. statków powietrznych C525, P180, CRJ7, CRJ9. W celu ich statystycznego pogrupowania, dla wartości przedstawionych powyżej wykonano analizę klastrową. Analiza ta polega na grupowaniu danych na podstawie obliczonej odległości pomiędzy poszczególnymi wartościami np. tymi przedstawionymi na rys.8.9. Następnie na podstawie porównywania odległości pomiędzy punktami, sąsiadujące obiekty są grupowane.

Istnieje kilka sposobów obliczania odległości pomiędzy poszczególnymi elementami zbioru. Najprostszym z nich jest metoda oparta o odległość euklidesową,

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (8.1)$$

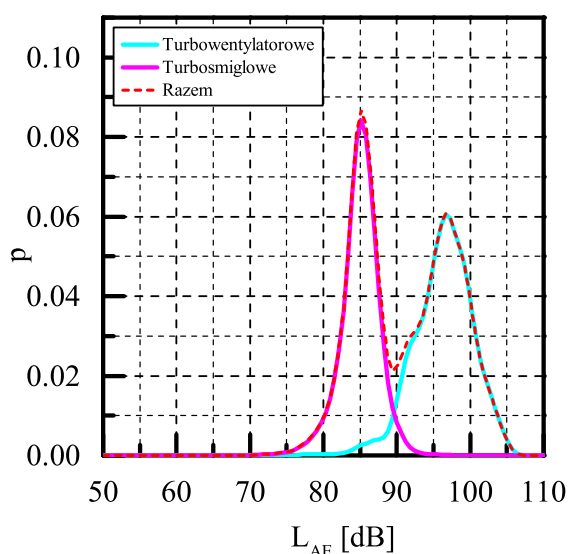
gdzie d oznacza poszukiwaną odległość a wartości x_i , y_i współrzędne punktów. Algorytmów grupowania odległości, podobnie jak ich obliczania, jest kilka. W ramach niniejszej pracy wybrano tzw. metodę średnich połączeń, która grupuje dane na podstawie porównywania średnich arytmetycznych odległości pomiędzy najbliższymi skupieniami.

Wynikiem takiej analizy jest dendrogram. Na rys.8.10 przedstawiono dendrogram wyznaczony dla omawianych ekspozycyjnych poziomów hałasu, na którym wyraźnie widać powstałe grupy statków powietrznych.

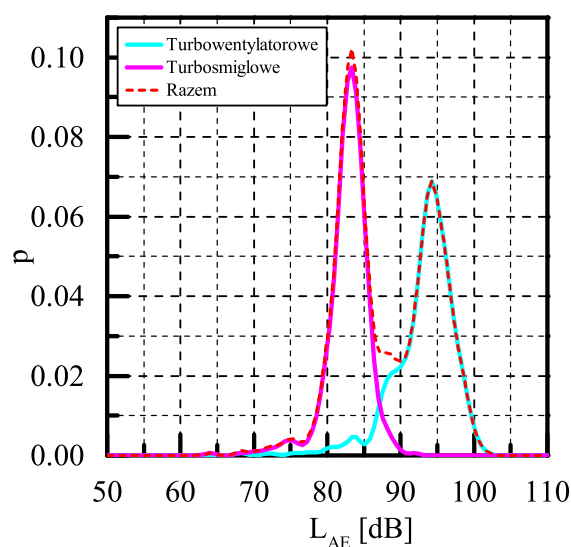


Rys.8.10. Wynik analizy skupień dla ekspozycyjnych poziomów hałasu rejestrowanych podczas operacji startu (analizę wykonano w programie STATISTICA)

Analizując typy napędów statków powietrznych, które wchodzą w skład dwóch najwyraźniejszych grup rozdzielonych czerwoną linią, zauważymy, że do jednej grupy należą samoloty z silnikiem turbośmigłowym i tłokowym (wyjątek stanowi samolot CRJ2). Drugą grupę tworzą samoloty z silnikiem turbowentylatorowym (za wyjątkiem samolotu P180; samolot ten zalicza się do grupy samolotów głośniejszych ponieważ jego śmigła napędowe zamontowane są z tyłu; w większości samolotów silnik „ciągnie” konstrukcję samolotu, a w przypadku P180 silniki ją „pchają”). Dzieląc zbiór startów zgodnie z przedstawionym powyżej kryterium, funkcje gęstości prawdopodobieństwa kształtują się tak jak na rys.8.11 oraz 8.12. Na rysunkach tych samoloty o napędzie turbośmigłowym stanowią jednorodną grupę, której rozkład L_{AE} jest symetryczny. Grupa silników turbowentylatorowych posiada tendencję do lewostronnej asymetrii. Podział dwumodalnej funkcji gęstości prawdopodobieństwa na dwie jednomodalne, potwierdzają przypuszczenia jakoby typ napędu stosowanego w samolotach różnicował ich poziomy ekspozycyjne.



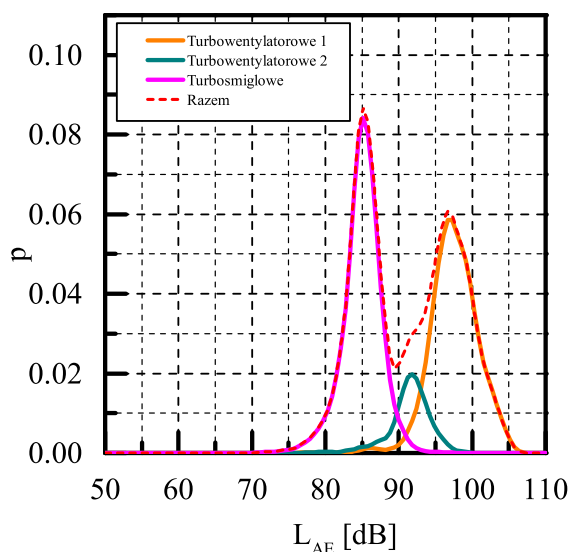
Rys.8.11. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla operacji startów z podziałem na dwie kategorie napędu, L_{AE} w punkcie P1 dla roku 2012



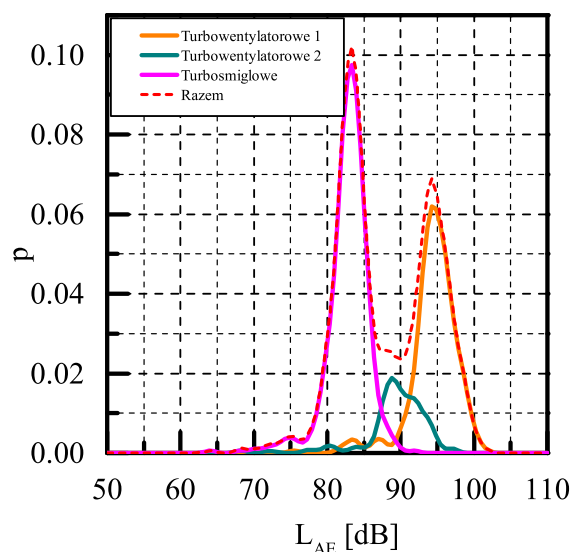
Rys.8.12. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla operacji startów z podziałem na dwie kategorie napędu, L_{AE} w punkcie P2 dla roku 2012

Analizując dendrogram przedstawiony na rys.8.10 tylko dla gałęzi silników turbowentylatorowych (powyżej czerwonej linii), można zauważyć, że występują w nim dwie podgrupy. Do jednej z nich należą samoloty B738, B734 oraz A320, do drugiej zaś

pozostałe z turbowentylatorowych. Podgrupy te zostały rozdzielone linią zieloną. Aby sprawdzić jak rozdzielią się wartości zbioru ekspozycyjnego poziomu hałasu uwzględniając podział na podgrupy silników turbowentylatorowych, wykreślono funkcje gęstości prawdopodobieństwa (rys.8.13 i 8.14). Jak widać, występująca lewostronna asymetria na rys.8.11 oraz 8.12 (niebieska krzywa) przekształciła się w jednorodną symetryczną funkcję gęstości prawdopodobieństwa.



Rys.8.13. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla operacji startu z podziałem na trzy kategorie, L_{AE} w punkcie P1 dla roku 2012



Rys.8.14. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla operacji startu z podziałem na trzy kategorie, L_{AE} w punkcie P2 dla roku 2012

Co ciekawe, nowo powstałe podgrupy dla klasy silników turbowentylatorowych, można powiązać z pewnym parametrem technicznym charakteryzującym te samoloty. Jest nim tzw. maksymalna masa startowa (MTOW¹⁴) czyli maksymalna masa, przy której dany statek powietrzny certyfikowany jest do lotu. Jest to wartość stała, przypisana do danego typu samolotu (nie jest ona tożsama z masą samolotu podczas wybranego startu). Samoloty które znalazły się w grupie nazwanej „Turbowentylatorowe 1” miały parametr $MTOW \geq 60$ ton „Turbowentylatorowe 2” zaś $MTOW < 60$ ton. Podobna analiza skupień, którą wykonano dla wartości L_{AE} związanych z operacją lądowania, nie przyniosła jakichkolwiek istotnych statystycznie podgrup. Spowodowane jest to tym, że w trakcie lądowania hałas silników wnosi mniejszy przyczynek do wypadkowego poziomu hałasu

¹⁴ (ang. Maximum Take-Off Weight)

samolotów (rys.8.6). Ekspozycyjne poziomy hałasu podczas lądowania dla obu rodzajów napędu są do siebie zbliżone. Z tego względu uznano lądowania za grupę jednorodną.

Podsumowując, na podstawie przedstawionych wyżej analiz należy wyróżnić cztery kategorie wydarzeń akustycznych. Kategorie te różnią się statystycznie wartością ekspozycyjnego poziomu hałasu i mają bezpośredni wpływ na finalny kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla populacji.

Zatem wydarzenia akustyczne związane z operacjami lotniczymi możemy podzielić na:

- starty samolotów turbośmigłowych i tłokowych – **kategoria 1,**
- starty samolotów z silnikiem turbowentylatorowym o $MTOW < 60$ ton – **kategoria 2,**
- starty samolotów z silnikiem turbowentylatorowym o $MTOW \geq 60$ ton – **kategoria 3,**
- lądowania samolotów – **kategoria 4.**

9. Eksperyment II – losowanie wartości L_{AE} z podziałem na kategorie wydarzeń akustycznych

Z analizy statystycznej otrzymanych wyników przedstawionej w rozdziale 8 wynika, że kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla wartości L_{AE} ma związek z czterema rodzajami operacji lotniczych. Są to:

- starty samolotów turbośmigłowych i tłokowych – kategoria 1,
- starty samolotów z silnikiem turbowentylatorowym o $MTOW < 60$ ton – kategoria 2,
- starty samolotów z silnikiem turbowentylatorowym o $MTOW \geq 60$ ton – kategoria 3,
- lądowania samolotów – kategoria 4.

Wynik eksperymentu pierwszego, wskazuje że duże zróżnicowanie wskaźników długookresowych (rozzuty rzędu 6-10 dB) może być zależne od niereprezentatywnej wartości średniej $\hat{L}_{AE,D} = \hat{L}_{AE,W} = \hat{L}_{AE,N} = \hat{L}_{AE}$. Intuicja podpowiada, że uwzględnienie wypracowanego podziału na kategorie w estymacji wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N , zminimalizuje ich rozrzut ΔL .

9.1. Charakterystyka eksperymentu

Celem eksperymentu II była minimalizacja rozrzutów estymowanych wskaźników długookresowych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . Za wynik satysfakcjonujący uznany będzie rozrzut estymowanych wskaźników długookresowych nie przekraczający 3 dB. W eksperymencie I wykazano, że nawet przy 100 wartościach L_{AE} rozrzut ΔL jest przekroczony dwukrotnie. Aby ocenić wpływ kategoryzacji wydarzeń akustycznych na ΔL , wykonano eksperyment zbliżony do tego opisanego w rozdziale 7. Różnica pomiędzy eksperymentami polegała na tym, że w eksperymencie II losowane wartości L_{AE} kategoryzowano tj. dzielono wylosowane dane na podzbiory zgodnie z wypracowanym podziałem. Dla każdej z czterech k-tych kategorii osobno obliczano średnią wartość ekspozycyjnego poziomu hałasu (wzór (3.8)) oraz odpowiadające im wartości w wskaźnikach $\hat{L}_D^{(k)}, \hat{L}_W^{(k)}, \hat{L}_N^{(k)}$ (wzór (3.9)). Liczbę operacji lotniczych danej kategorii

przyjętych do obliczania wskaźników $\hat{L}_D^{(k)}$, $\hat{L}_W^{(k)}$, $\hat{L}_N^{(k)}$ obliczono na podstawie procentowego udziału statków powietrznych. Wartości przyjęte do obliczeń zestawiono w tab.9.1.

Tab.9.1. Liczba operacji lotniczych wykorzystywana do obliczeń wskaźników długookresowych.

Pora doby	Średnioroczna liczba operacji							
	dla punktów zlokalizowanych na zachód od ARP				dla punktów zlokalizowanych na wschód od ARP			
	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 4	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 4
Dzień	8.0	2.2	6.5	3.9	1.4	0.4	1.1	14.3
Wieczór	2.7	0.1	2.5	1.2	0.6	0.0	0.3	3.6
Noc	0.6	0.2	1.1	1.1	0.1	0.1	0.2	3.6

Następnie obliczano sumaryczny poziom dla danej pory doby według następujących wzorów:

$$\hat{L}_D = 10 \cdot \log \left(\sum_{j=1}^4 10^{0.1 \cdot \hat{L}_D^{(j)}} \right), \quad (9.1)$$

$$\hat{L}_W = 10 \cdot \log \left(\sum_{j=1}^4 10^{0.1 \cdot \hat{L}_W^{(j)}} \right), \quad (9.2)$$

$$\hat{L}_N = 10 \cdot \log \left(\sum_{j=1}^4 10^{0.1 \cdot \hat{L}_N^{(j)}} \right), \quad (9.3)$$

gdzie wartości $\hat{L}_D^{(k)}$, $\hat{L}_W^{(k)}$, $\hat{L}_N^{(k)}$ oznaczają estymowany średni długookresowy poziom dźwięku A dla pór dziennej, wieczornej i nocnej, k tej kategorii w wydarzeń akustycznych.

9.2. Wyniki eksperymentu

Ostateczne wyniki estymacji wskaźników długookresowych otrzymywano ze wzoru (2.13) oraz wymienionego powyżej wzoru (9.3). Podobnie jak w eksperymencie pierwszym, przeprowadzono $l = 500$ losowań dla różnych wartości n . W identyczny sposób obliczano także rozrzut wyników oraz wartość średnią (metodę obliczania opisano w rozdziale 6.2). Otrzymane wyniki przedstawiają tab.9.2 oraz 9.3.

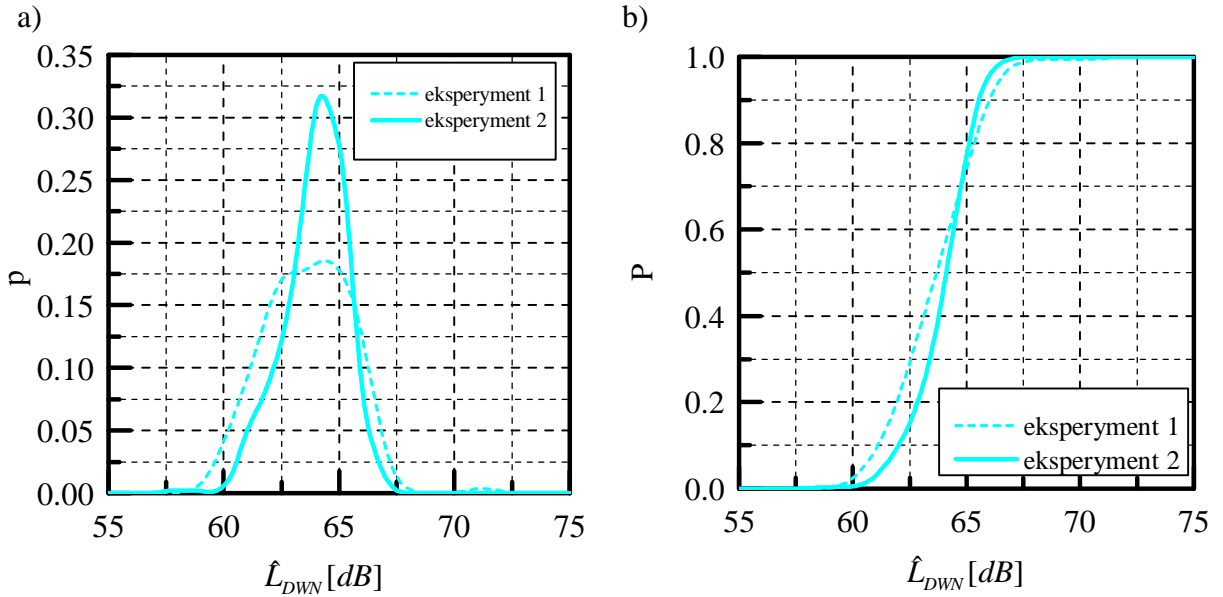
Tab.9.2. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , liczba losowań $l = 500$, przy obliczaniu zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
1	54.6	13.3	11.4	45.4	14.7	12.9
5	61.6	6.3	9.9	52.9	6.3	10.3
10	63.1	4.0	7.2	54.4	4.0	6.8
25	63.8	2.7	3.7	55.1	2.7	3.8
50	63.9	2.3	3.0	55.3	2.3	3.0
80	64.0	2.0	2.9	55.4	1.9	2.9
100	64.1	1.7	2.5	55.4	1.7	2.5

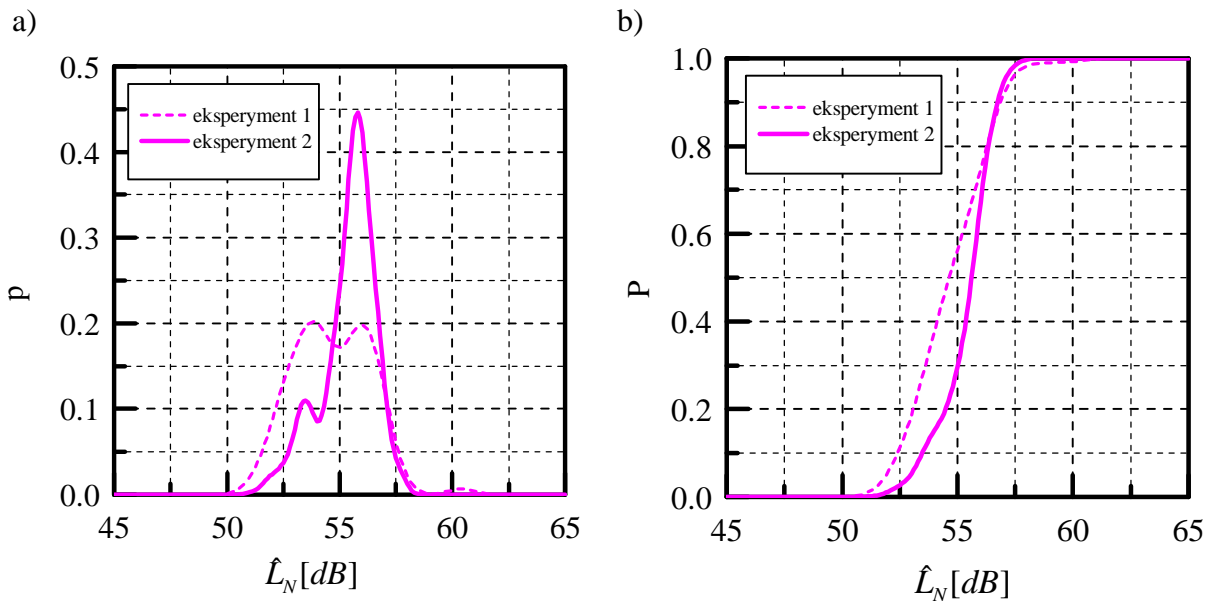
Tab.9.3. Wyniki symulacji w punkcie P2 dla różnych wartości n , liczba losowań $l = 500$, przy obliczaniu zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
1	51.2	7.8	13.3	43.0	8.4	17.0
5	53.6	3.7	4.6	45.9	3.7	5.1
10	54.3	3.8	3.6	46.5	3.6	4.1
25	54.7	2.9	3.1	46.9	2.6	3.0
50	55.3	2.7	2.6	47.4	2.4	2.3
80	55.6	2.2	2.5	47.7	2.0	2.2
100	55.8	2.4	2.7	47.8	2.2	2.4

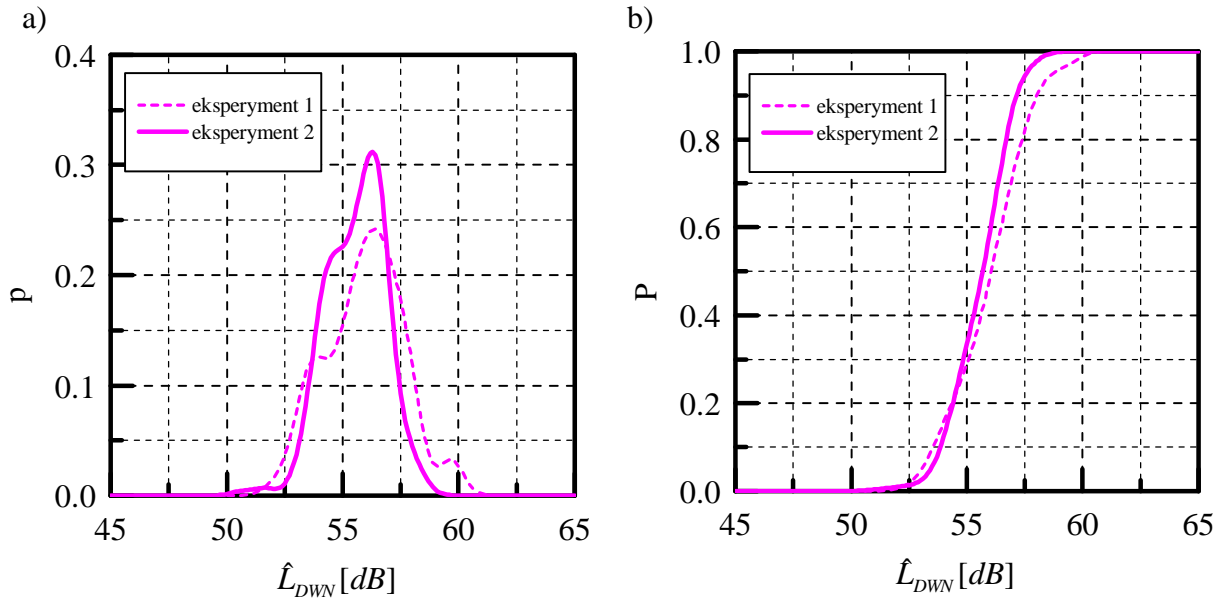
Porównując wyniki eksperymentu I z wynikami eksperymentu II przedstawione odpowiednio w tabelach 7.3, 7.4 oraz 9.1, 9.2 widoczna jest różnica dla odstępów między granicami przedziału a wartością średnią. Uwzględnienie podziału wartości L_{AE} na kategorie wydarzeń akustycznych minimalizuje szerokość 95% przedziału prawdopodobieństwa wystąpienia wartości prawdziwej. Co prawda nie osiągnięto zakładanego rozrzutu 3 dB, jednak otrzymane wartości dla prób większych od $n = 25$ są mniejsze niż 6 dB. W przypadku eksperymentu I nie uzyskano takiej wartości nawet dla prób gdzie n wynosiło 100. W celu porównania obu eksperymentów nałożono na siebie krzywe gęstości prawdopodobieństwa, wykreślone dla wybranych wartości n (rys.9.1- 9.4).



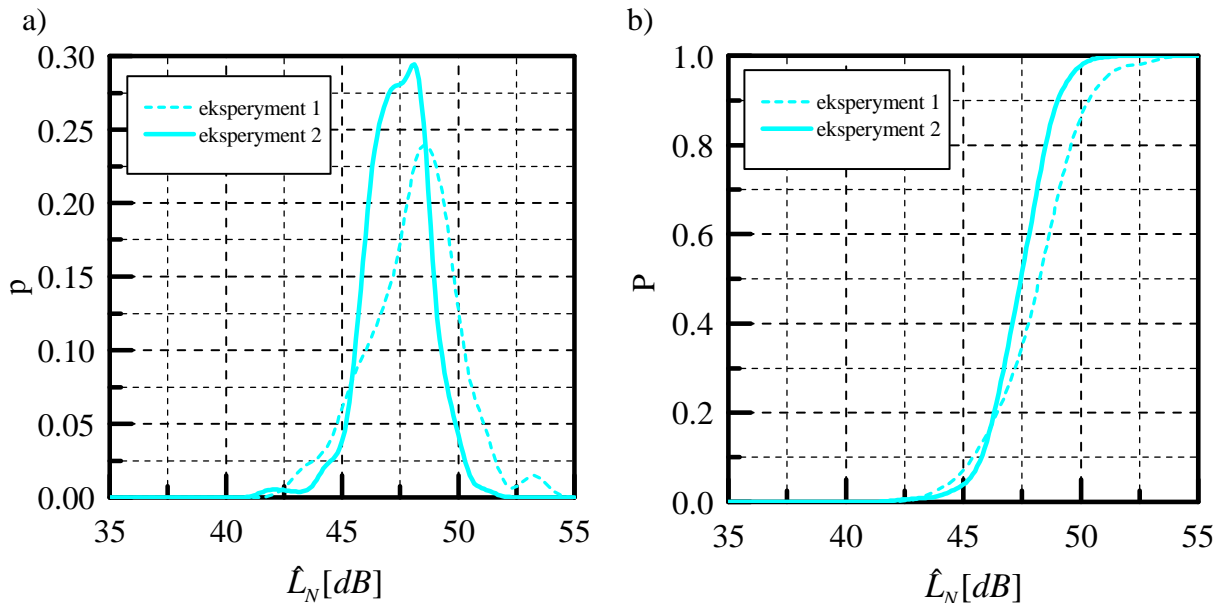
Rys.9.1. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P1, $l = 500$, porównanie krzywych z eksperymentów I i II dla $n = 50$, wskaźnik L_{DWN}



Rys.9.2. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P1, $l = 500$, porównanie krzywych z eksperymentów I i II dla $n = 80$, wskaźnik L_N



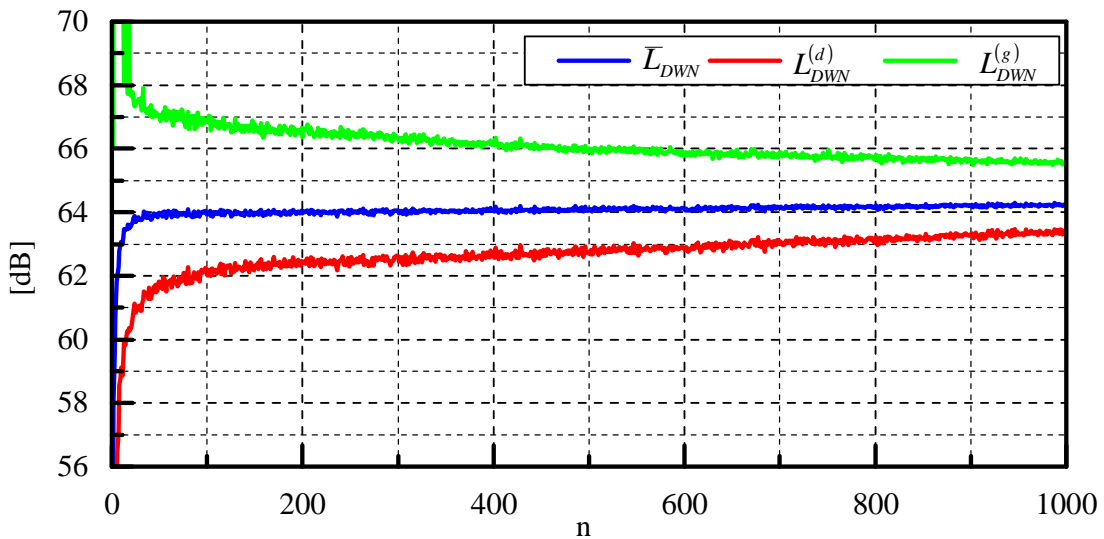
Rys.9.3. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P2, $l = 500$, porównanie krzywych z eksperymentów I i II dla $n = 80$, wskaźnik L_{DWN}



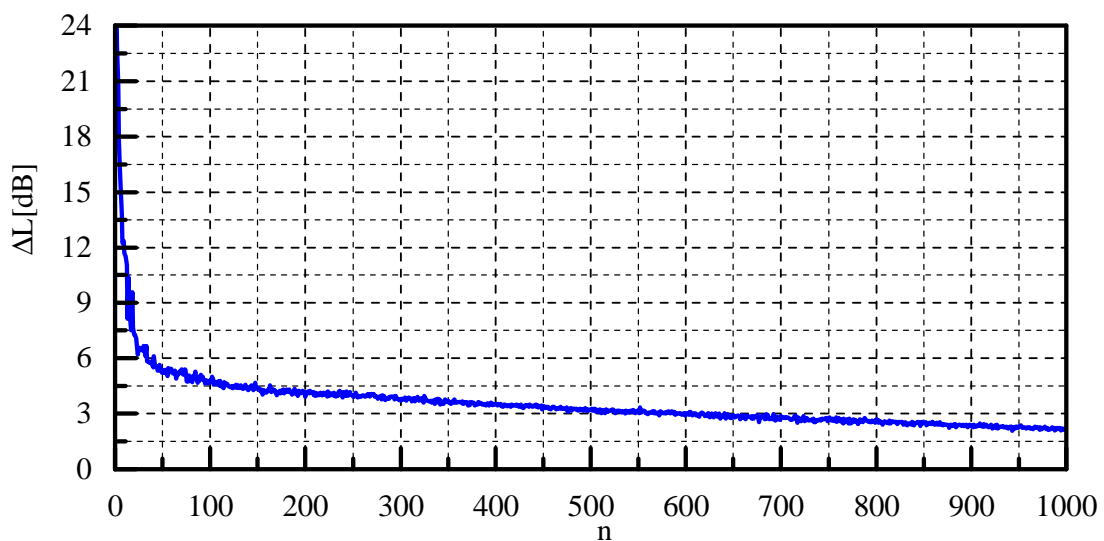
Rys.9.4. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanta (b). Punkt P2, $l = 500$, porównanie krzywych z eksperymentów I i II dla $n = 50$, wskaźnik L_N

Ocena jakościowa funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuant potwierdza obserwacje, poczynione na podstawie porównania danych w tabelach 7.3, 7.4 oraz 9.1, 9.2. Jak widać, uzyskiwane krzywe gęstości prawdopodobieństwa dla tych samych wartości n są bardziej smukłe, co świadczy o mniejszym rozrzucie otrzymywanych wyników. Również dystrybuanty są bardziej strome, gdy obliczenia odbywają się w oparciu o dzielone na kategorie wartości L_{AE} . W przypadku punktu P2 różnicowanie pomiędzy wartościami otrzymanymi w eksperymencie I i eksperymencie II jest mniejsze.

Wynika to z faktu, iż dominującymi w tym punkcie są operacje lądowania, które nie zostały podzielone na kategorie wydarzeń akustycznych (rozdział 8.2). Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wartości ekspozycyjnego hałasu dla lądowań jest zbliżona do tej wykreślonej dla wszystkich elementów zbioru (rys.8.5). W eksperymencie II wykreślono analogiczne do rys.7.5 i 7.6 zależności zmian wartości średniej \bar{L}_{DWN} , granic przedziału $L_{DWN}^{(g)}$, $L_{DWN}^{(d)}$ oraz rozrzutu ΔL od wartości n . Zmiany tych parametrów przedstawiono na rys.Rys.9.5 i 9.6



Rys.9.5. Zależność pomiędzy \bar{L}_{DWN} , $L_{DWN}^{(g)}$ oraz $L_{DWN}^{(d)}$ a liczbą pomiarów n w punkcie P1 z uwzględnieniem podziału na kategorie wydarzeń akustycznych

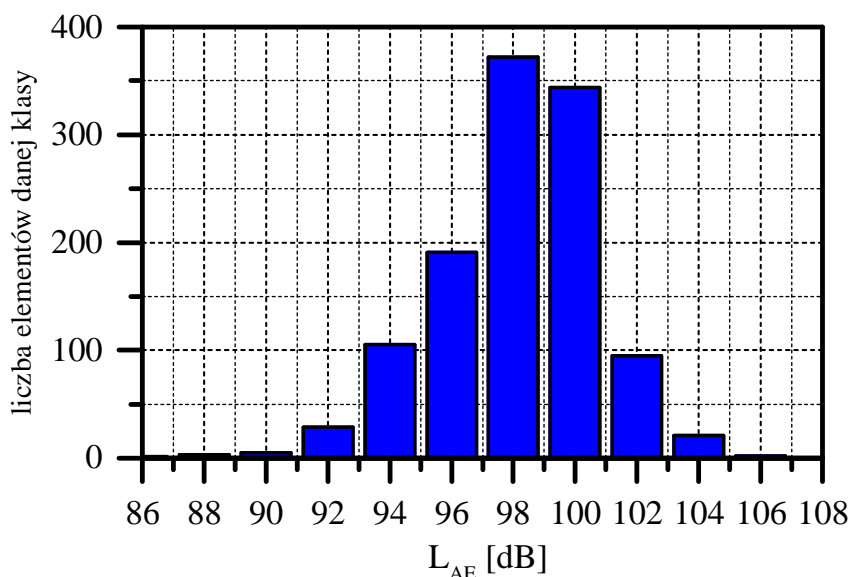


Rys.9.6. Zależność pomiędzy ΔL , a liczbą pomiarów n w punkcie P1 z uwzględnieniem podziału na kategorie wydarzeń akustycznych

Jak widać na rys.9.6 wartość $\Delta L \leq 3$ dB osiągnięto dla n około 550. Jest to dowód na to, że podział danych na kategorie minimalizuje rozrzut estymowanych wartości średniorocznych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . W przypadku kategoryzacji, moc zbioru wartości L_{AE} dająca wyniki różniące się od wartości prawdziwej o mniej niż 1.5 dB, może być prawie trzykrotnie mniejsza niż w przypadku gdy nie wykonywano podziału danych. Uzyskany wynik rzędu $n = 550$ nie jest jednak satysfakcjonujący. Zakłada się, że docelowo wartość n nie powinna być większa niż 100. Taka wartość, w zależności od lotniska pozwala wykonać pomiary krótkotrwałe w przeciągu od 1 do kilku dni. Jako, że jedynym źródłem zmienności wartości długookresowych jest zmienność wartości krótkookresowych, należy się przyjrzeć co ją determinuje. Analizie zmienności wartości L_{AE} , w każdej z czterech kategorii wydarzeń akustycznych, poświęcony zostanie kolejny rozdział niniejszej dysertacji.

10. Analiza czynnikowa zbioru wartości L_{AE}

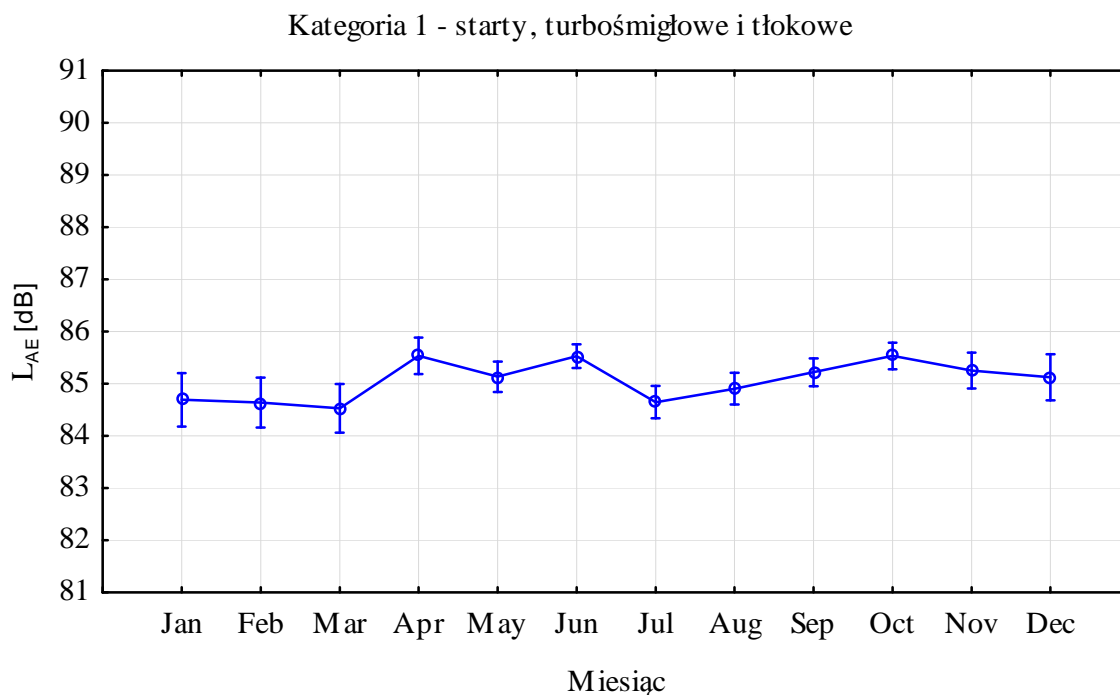
Jak wynika z przeprowadzonej w poprzednich rozdziałach analizy, wartości ekspozycyjnych poziomów hałasu dla poszczególnych typów samolotów są mocno zróżnicowane. Rys.10.1 przedstawia histogram wartości L_{AE} dla najczęściej występującego samolotu na lotnisku testowym, ale również na świecie tj. B738.



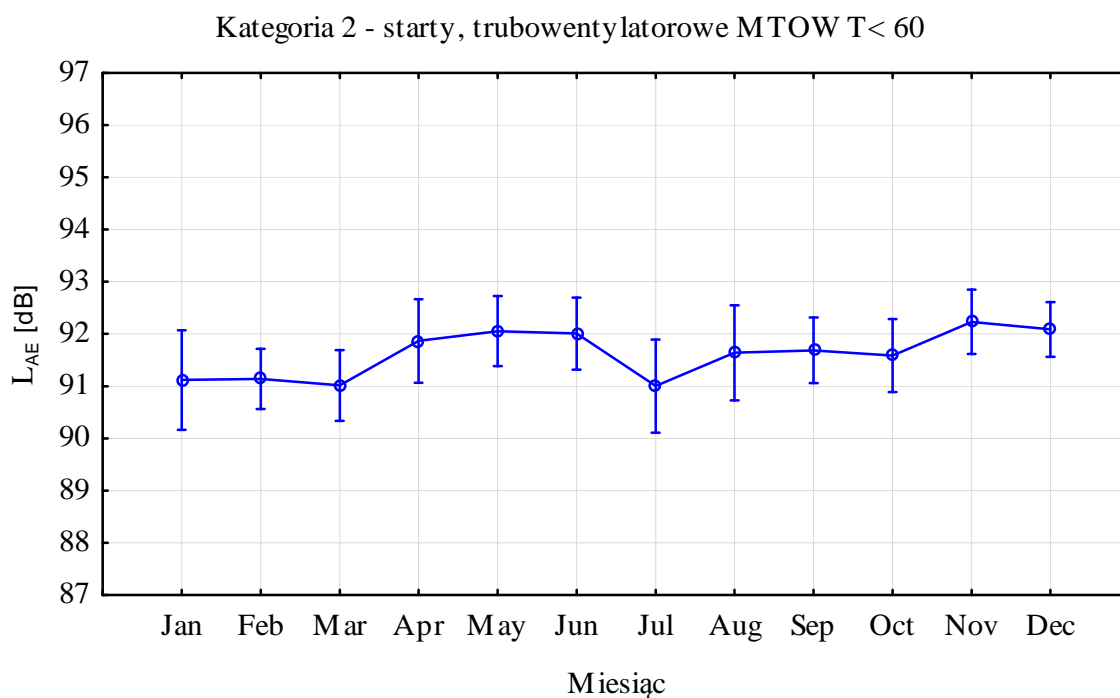
Rys.10.1. Histogram ekspozycyjnego poziomu hałasu dla samolotu Boeing 737-800, (punkt P1, operacje startu).

Przyczyn dużego rozstępu wartości L_{AE} jest wiele. Pierwsza z nich to stan techniczny poszczególnych egzemplarzy tego typu samolotu. Boeing 737-800 produkowany jest od 1967 roku, natomiast obecne modele od 1996. Prawdopodobieństwo, że część statków operujących na konkretnym lotnisku ma więcej niż 10 lat jest zatem duże. Z wiekiem urządzenia mechaniczne bardzo często powodują większą emisję hałasu, co wynika ze zużycia pewnych elementów. W przypadku samolotów również obserwuje się tego typu zjawisko. Drugą przyczyną zróżnicowanej emisji hałasu jest masa samolotu. Większa masa statku powietrznego, wymaga użycia większego ciągu silników. Zwiększenie ciągu niesie ze sobą większą emisję hałasu do otoczenia. W zbiorze danych, który wykorzystuje się w tej pracy brak jest informacji na temat wieku statków powietrznych, nie ma też informacji o liczbie pasażerów oraz masie paliwa w danym samolocie. Biorąc jednak pod uwagę wzrost popularności lotów np. w okresie wakacyjnym i wiążąc to ze zwiększoną masą samolotu należy spodziewać się większych wartości

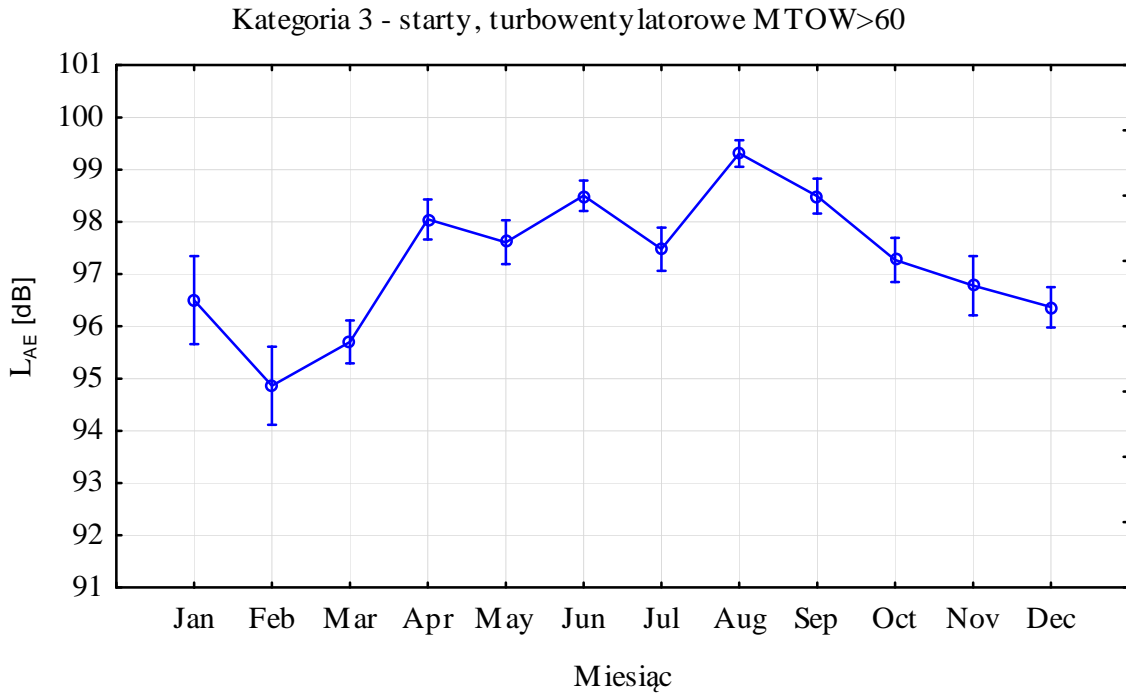
poziomu hałasu w miesiącach letnich. W celu sprawdzenia tego faktu wykonano czynnikową analizę wariancji (ANOVA). Badania przeprowadzono dla poszczególnych kategorii wydarzeń akustycznych, które wprowadzono w rozdziale 8. Na rys.10.2 – 10.5 przedstawiono średnie wartości ekspozycyjnego hałasu wraz z przedziałami ufności.



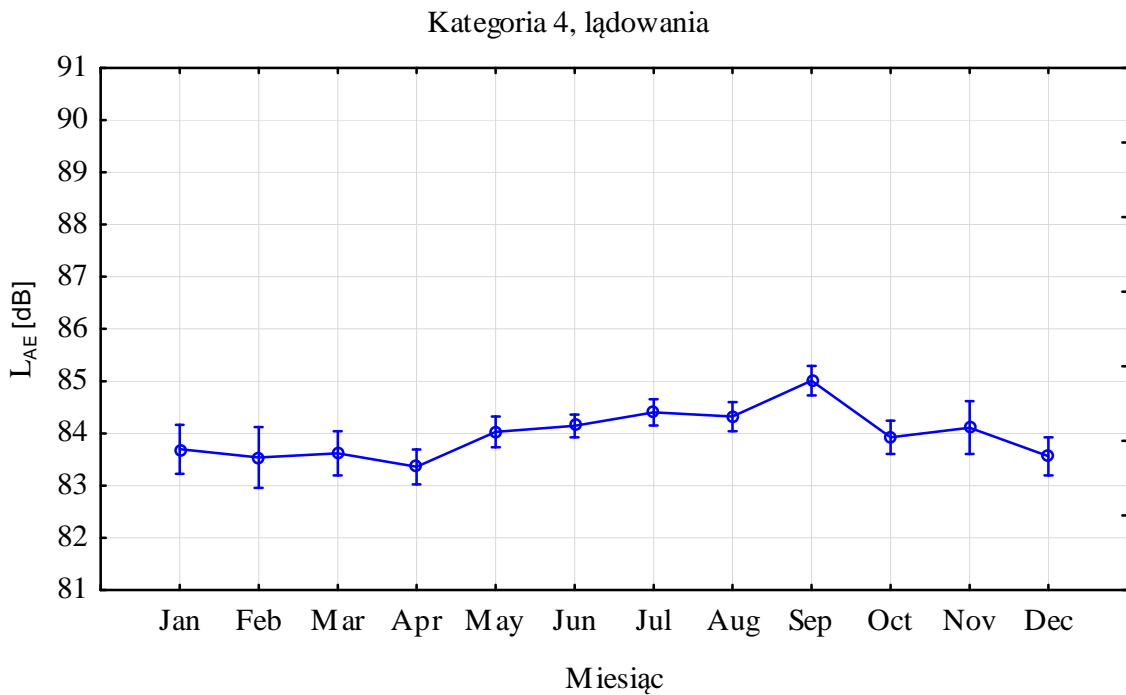
Rys.10.2. Średni poziom ekspozycyjny w kolejnych miesiącach, kategoria 1, punkt P1.



Rys.10.3. Średni poziom ekspozycyjny w kolejnych miesiącach, kategoria 2, punkt P1.



Rys.10.4. Średni poziom ekspozycyjny w kolejnych miesiącach, kategoria 3, punkt P1.



Rys.10.5. Średni poziom ekspozycyjny w kolejnych miesiącach, kategoria 4, punkt P2.

Na rys.10.4 widać, że w okresie od kwietnia do września wartości L_{AE} dla kategorii 3 (do której należą samoloty obsługujące loty czarterowe) zwiększają się, co potwierdza

zróznicowanie wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu pomiędzy różnymi okresami w roku. Również dla operacji lądowań – kategoria 4 - widać wzrost poziomów L_{AE} w okresie letnim. W przypadku kategorii 1 i 2 tendencja ta, już nie jest tak widoczna. Za wyjątkiem kategorii 2, wyniki analizy post hoc w oparciu o test Tukey'a wskazują, że czynnik miesiąca jest istotny statycznie, choć nie dla wszystkich miesięcy. Zróznicowanie rzędu kilku decybeli pomiędzy miesiącami może być przyczyną rozrzutów wskaźników długoterminowych, które otrzymano w eksperymencie II. Można sobie wyobrazić sytuację, że część z $l = 500$ losowań wykonywanych w eksperymencie II obejmowała miesiące, kiedy średni ekspozycyjny poziom hałasu L_{AE} był niższy, a część wtedy gdy ten był wyższy. Przekłada to się bezpośrednio na uzyskiwane wartości wskaźników \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . Powyższe obserwacje zostaną uwzględnione w trakcie przeprowadzania kolejnego eksperymentu (rozdział 11). W ramach niego przeprowadzony zostanie szereg prób, w trakcie których zmiennymi będą liczba dni pomiarowych oraz odstępy czasu pomiędzy nimi.

11. Eksperyment III – losowanie wartości L_{AE} z uwzględnieniem podziału na kategorie oraz dat pomiarów

Aby sprawdzić przypuszczenia z rozdziału 10, iż zróżnicowanie w estymowanych wskaźnikach \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N spowodowane jest zmiennością miesięczną wartości L_{AE} przeprowadzono eksperyment komputerowy, w którym losowano wartości L_{AE} mierzone w pewnych odstępach czasowych, Δd . Uwzględniono także możliwość wykonywania pomiarów w kilku sesjach.

11.1. Charakterystyka eksperymentu

W eksperymentach I i II, każdorazowo losowano dzień rozpoczęcia wirtualnych pomiarów, a następnie wybierano n kolejnych wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. W przypadku eksperymentu I obliczano średnią wartość \hat{L}_{AE} na podstawie n -elementowego zbioru wylosowanego z populacji. W eksperymentach II dodatkowo dzielono wylosowane wartości na kategorie wydarzeń akustycznych. Losowania wykonywano dla różnych wartości n . Dla każdej wartości n wykonywano $l = 500$ losowań. W tym eksperymentach wprowadza się kolejny czynnik, który może zmniejszyć rozrzut estymowanych w losowaniach, wartości wskaźników długookresowych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . Zmianą tą jest losowy wybór kilku dni, a nie jak dotąd tylko jednego, w których wykonywano wirtualne pomiary. Z populacji nadal wybierane jest n wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu, przy czym zbiór tych wartości jest sumą mniejszych, równolicznych zbiorów, których liczba odpowiada liczbie, d , dni w których wykonywano pomiary. Przykładowo wylosowano $d = 2$, daty rozpoczęcia pomiarów, : 21 marca 2012 oraz 30 kwietnia 2012. Przyjmując liczbę losowanych elementów zbioru np. $n = 100$, z populacji wybrano 50 wartości L_{AE} zarejestrowanych po 21 marca oraz kolejne 50 wartości L_{AE} po 30 kwietnia. Przy obliczaniu wskaźników długookresowych w oparciu o ten sposób losowania, dokonywano również podziału na 4 kategorie wydarzeń akustycznych (rozdział 8). W eksperymentach wykonano ponadto symulacje dla różnej liczby, d , dni pomiarowych oraz różnych odstępów czasowych Δd pomiędzy datami pomiarów. Liczba elementów zbioru, n , wykorzystywanych do symulacji zmieniała się podobnie jak w poprzednich symulacjach. Liczby operacji lotniczych danych kategorii

wydarzeń akustycznych, $\tilde{N}_D^{(k)}$, $\tilde{N}_W^{(k)}$, $\tilde{N}_N^{(k)}$ przyjęte do obliczeń były identyczne jak w eksperymencie II (tab.9.1).

11.2. Wyniki eksperymentu

Obliczenia wartości wskaźników długookresowych, podobnie jak w eksperymencie II, wykonywano w oparciu o wzory (9.1) - (9.3) oraz (2.13). Wartości $\hat{L}_D^{(k)}$, $\hat{L}_W^{(k)}$, $\hat{L}_N^{(k)}$ obliczane były ze zbioru wartości L_{AE} , który był sumą równolicznych zbiorów uzyskanych w wybranych, oddalonych od siebie w czasie dniach pomiarowych. Podobnie jak w przypadku eksperymentu II wartości ekspozycyjnych poziomów hałasu dzielone były na podzbiory ze względu na kategorię wydarzeń akustycznych. W tab.11.1 – 11.9 przedstawiono wyniki obliczeń dla wybranych wartości n z uwzględnieniem liczby dni w jakich wykonywane pomiary oraz odstępu czasowego Δd pomiędzy sesjami pomiarowymi. Kolorem zielonym oznaczono te serie, w których udało się spełnić założenie postawione na początku pracy aby różnice $L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ oraz $\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ były jednocześnie mniejsze od 1.5 dB.

Tab.11.1. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywanie $d = 2$ razy w odstępie 15 dniowym

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.8	2.7	3.0	55.1	2.7	3.0
50	64.0	1.9	2.5	55.4	1.9	2.5
80	64.0	1.9	2.4	55.4	1.9	2.4
100	64.0	1.7	2.5	55.3	1.7	2.4

Tab.11.2. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywanie $d = 2$ razy w odstępie 30 dniowym

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.7	2.6	2.7	55.0	2.6	2.7
50	63.9	1.7	2.3	55.2	1.7	2.3
80	64.0	1.8	2.2	55.3	1.8	2.2
100	64.0	1.7	2.0	55.4	1.7	2.0

Tab.11.3. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 2$ razy w odstępie 60 dniowym

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.9	2.3	3.0	55.2	2.3	2.9
50	64.0	1.8	2.3	55.3	1.8	2.3
80	64.1	1.6	2.0	55.4	1.6	2.0
100	64.0	1.5	1.9	55.3	1.5	1.9

Tab.11.4. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 3$ razy w odstępie 15 dniowym

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.8	2.3	2.6	55.1	2.3	2.6
50	64.0	1.8	2.5	55.3	1.8	2.4
80	64.0	1.5	2.1	55.3	1.4	2.1
100	64.0	1.5	2.1	55.4	1.5	2.1

Tab.11.5. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 3$ razy w odstępie 30 dniowym.

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.8	2.2	2.4	55.2	2.2	2.4
50	63.9	1.8	2.2	55.3	1.8	2.2
80	64.0	1.4	1.8	55.4	1.4	1.8
100	64.1	1.5	1.8	55.4	1.5	1.8

Tab.11.6. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 3$ razy w odstępie 60 dniowym.

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.8	2.1	2.4	55.1	2.0	2.4
50	64.0	1.6	1.8	55.4	1.6	1.8
80	64.0	1.4	1.5	55.3	1.4	1.5
100	64.1	1.4	1.4	55.4	1.4	1.4

Tab.11.7. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 4$ razy w odstępie 15 dniowym

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.9	2.3	2.7	55.2	2.2	2.8
50	63.9	1.6	2.5	55.3	1.6	2.5
80	64.0	1.4	2.0	55.3	1.4	2.0
100	64.0	1.3	2.0	55.4	1.3	2.0

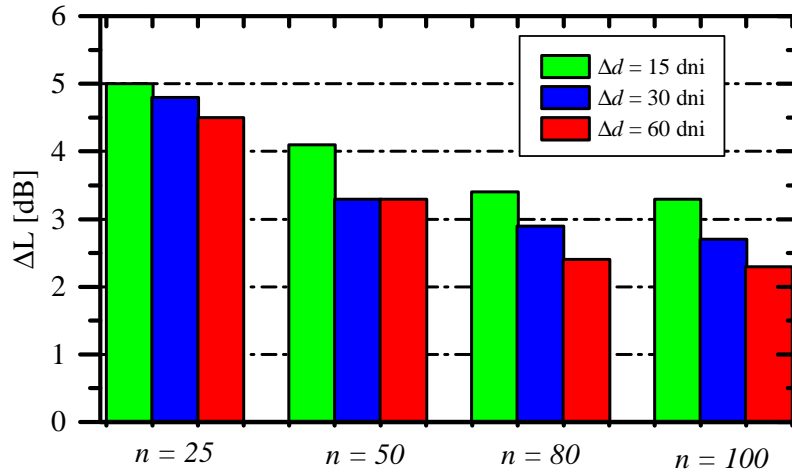
Tab.11.8. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 4$ razy w odstępie 30 dniowym

n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.8	2.2	2.6	55.1	2.2	2.6
50	64.0	1.5	1.8	55.4	1.5	1.7
80	64.1	1.4	1.5	55.5	1.4	1.5
100	64.1	1.2	1.5	55.5	1.2	1.5

Tab.11.9. Wyniki symulacji w punkcie P1 dla różnych wartości n , (liczba losowań $l = 500$). Zastosowano podział na 4 kategorie wydarzeń akustycznych, wirtualne pomiary wykonywane $d = 4$ razy w odstępie 60 dniowym

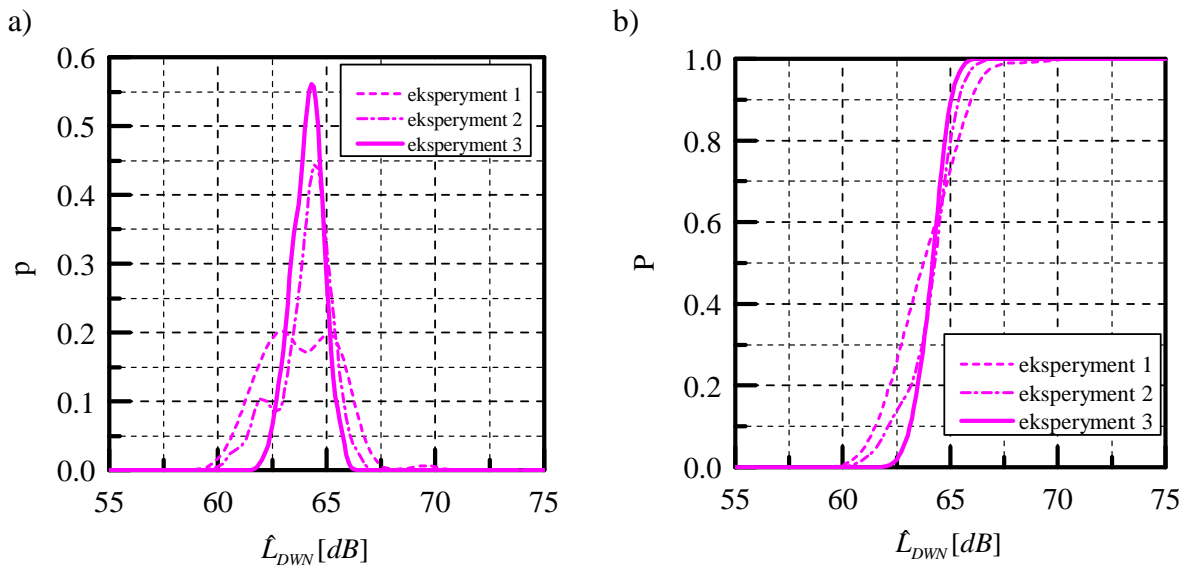
n	\bar{L}_{DWN} [dB]	$L_{DWN}^{(g)} - \bar{L}_{DWN}$ [dB]	$\bar{L}_{DWN} - L_{DWN}^{(d)}$ [dB]	\bar{L}_N [dB]	$L_N^{(g)} - \bar{L}_N$ [dB]	$\bar{L}_N - L_N^{(d)}$ [dB]
25	63.8	2.3	2.2	55.1	2.3	2.3
50	64.1	1.5	1.8	55.4	1.5	1.8
80	64.0	1.1	1.3	55.4	1.1	1.3
100	64.0	1.2	1.1	55.4	1.1	1.1

Porównując otrzymane wyniki z wynikami eksperymentu II widać, że podział na kilka sesji pomiarowych, z różnym odstępem czasowym, istotnie minimalizuje rozrzut wyników. Najbardziej zauważalne jest to w sytuacji gdy pomiary wykonywano dwukrotnie. Efekt minimalizacji rośnie wraz z liczbą dni pomiarowych. Nie bez znaczenia jest tutaj także odstęp pomiędzy poszczególnymi sesjami pomiarowymi. Wraz ze wzrostem odstępu pomiędzy pomiarami maleje rozrzut otrzymywanych wyników (rys.11.1).

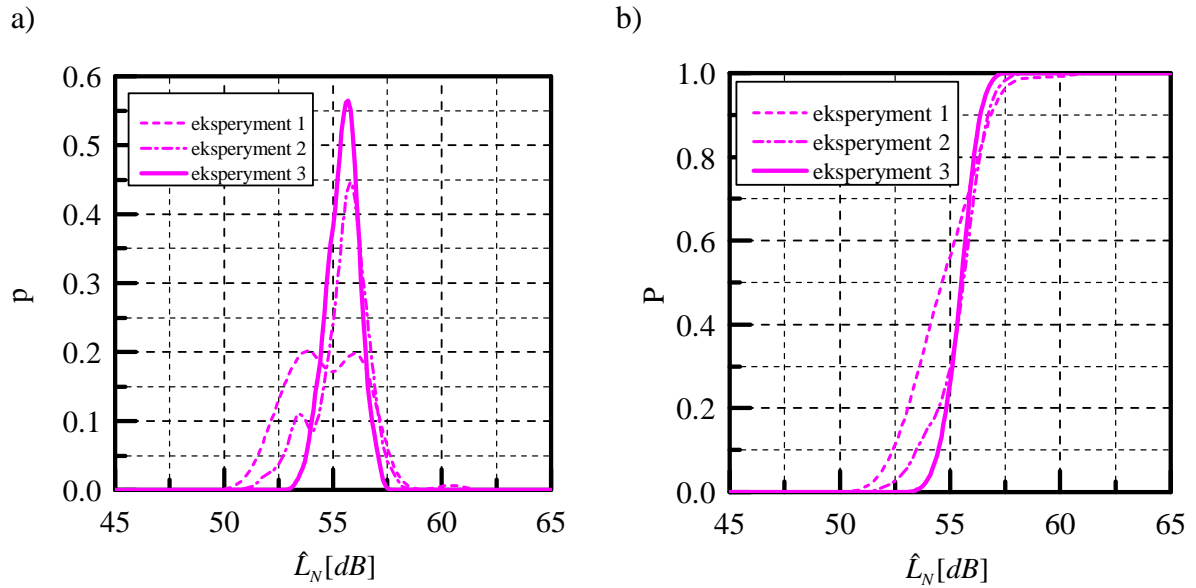


Rys.11.1. Zmiany ΔL w funkcji mocy zbioru (n) używanego do estymacji \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N oraz w funkcji Δd . Liczba dni $d = 4$

Na rysunkach rys.10.2 – 10.5 pokazano zmienność wartości L_{AE} w zależności od miesiąca. Zwiększając odstęp pomiędzy sesjami pomiarowymi, zwiększamy prawdopodobieństwo wykonywania pomiarów w różnych miesiącach w roku, co powoduje zmniejszenie rozrzutu wartości estymowanych ΔL . W kilku przypadkach otrzymano rozrzuty mniejsze niż 3 dB (rys.11.1). Na rys.11.2– 11.3 przedstawiono krzywe gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty dla wskaźników \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N uzyskane w eksperymentach I, II i III. Analizując ich kształty widać, że rozkłady wartości estymowanych zgodnie z metodyką przedstawioną w eksperymencie III są bardziej smukłe zaś dystrybuanty bardziej strome w porównaniu do tych z eksperymentów I i II.



Rys.11.2. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanty (b). Punkt P1, liczba losowań $l = 500$, porównanie krzywych z eksperymentów I, II i III dla $n = 80$, wskaźnik L_{DWN} .



Rys.11.3. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa (a) oraz dystrybuanty (b). Punkt P1, liczba losowań $l = 500$, porównanie krzywych z eksperymentów I, II i III dla $n = 80$, wskaźnik L_N .

Dla przykładu porównano ze sobą wirtualne pomiary krótkotrwałe, w których zarejestrowano $n = 80$ wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu. W przypadku eksperymentu I, rozrzut dla $l = 500$ losowań był największy i wynosił $\Delta L = 6.2$ dB. Wprowadzenie kategoryzacji (eksperyment II) zminimalizowało ten rozrzut do $\Delta L = 4.9$ dB, jednak nie był to wynik zadowalający. Dopiero wprowadzenie pomiarów kilkukrotnych w pewnych dostęпах czasowych pozwoliło otrzymać wartość rozrzutu $\Delta L = 2.9$ dB czyli mniejszą niż zakładane 3 dB.

Podsumowując, w trakcie wykonywania pomiarów, mających na celu estymację wskaźników długookresowych w oparciu o wskaźniki krótkookresowe należy zachowywać odstępy czasowe pomiędzy poszczególnymi sesjami pomiarowymi. Wyniki w tab.11.8 pokazują, że odstępy pomiędzy sesjami rzędu 30 dni dają już oczekiwane rezultaty tj. rozrzut wyników jest mniejszy niż 3 dB. Należy pamiętać, że tak mały rozrzut jest możliwy do uzyskania w przypadku, gdy wyniki pomiarów są podzielone na kategorie wydarzeń akustycznych. Otrzymane powyżej wyniki świadczą o tym, że możliwe jest określenie wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w oparciu o krótkotrwałe pomiary wartości L_{AE} . Różnica między wartością estymowaną a wynikiem rzeczywistym przy wykorzystaniu takiej metody nie przekracza 1.5 dB.

12. Niepewność długoterminowego wskaźnika oceny hałasu

W poprzednim rozdziale pokazano, że możliwe jest określanie wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w oparciu o pomiary wartości L_{AE} w taki sposób, aby nie różniły się one znacząco od wartości prawdziwej. Metoda ta polega na próbkowaniu wartości L_{AE} . Następnie, ze zbiorów tych oblicza się średnią wartość \hat{L}_{AE} , która służy do estymacji wartości długookresowych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . Przedstawiona metoda zakłada podział zbioru wartości L_{AE} na podzbiory pokrywające się z ustalonymi kategoriami wydarzeń akustycznych. Każdy podzbiór charakteryzuje się rozrzutem wartości, wpływającym na niepewność wartości estymowanych \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . W podrozdziale 4.4 pokazano jak oblicza się niepewność wskaźników długookresowych, bazując na odchyleniu standardowym wartości L_{AE} . Ze względu na to, że zaproponowana metoda estymacji wskaźników L_{DWN} i L_N uwzględnia podział na kategorie wydarzeń akustycznych, metodę z rozdziału 4.4 należy rozwinąć.

Zakładając, że znana jest dokładna liczba operacji samolotów poszczególnych typów z podziałem na kierunki operacji, źródłem niepewności jest wyłącznie rozrzut wyników wartości L_{AE} . Zgodnie z wytycznymi GUM, niepewność złożoną typu A oblicza się z zależności (12.1):

$$u_{CA}(y) = \sqrt{\sum_{g=1}^G \left[\frac{\partial f(\dots)}{\partial x_k^{(g)}} \right]^2 \cdot u_A^2(x_k^{(g)})}, \quad (12.1)$$

gdzie,

$$u_A(x_k^{(g)}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{jk} - \hat{x}_k)^2}, \quad (12.2)$$

oznacza odchylenie standardowe, x_{jk} to odlogarytmowane wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu $e_j = 10^{0.1 \cdot L_{AE}^{(j)}}$ k -tej kategorii. Zmiennymi dla których chcemy obliczyć niepewność są wskaźniki \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N ,

$$\hat{L}_{DWN} = 10 \cdot \log(\hat{Y}_{DWN}) \quad (12.3)$$

oraz

$$\hat{L}_N = 10 \cdot \log(\hat{Y}_N). \quad (12.4)$$

Uwzględniając podział na kategorie wydarzeń akustycznych, wartości Y_{DWN} oraz Y_N oblicza się ze wzorów:

$$Y_{DWN} = t_0 \left[\frac{1}{2 \cdot T_D} \sum_{k=1}^4 \tilde{N}_D^{(k)} \cdot \hat{X}_k + \frac{\sqrt{10}}{6 \cdot T_W} \sum_{k=1}^4 \tilde{N}_W^{(k)} \cdot \hat{X}_k + \frac{10}{3 \cdot T_N} \sum_{k=1}^4 \tilde{N}_N^{(k)} \cdot \hat{X}_k \right], \quad (12.5)$$

oraz

$$Y_N = \frac{t_0}{T_N} \sum_{k=1}^4 \tilde{N}_N^{(k)} \cdot \hat{X}_k, \quad (12.6)$$

gdzie sumowanie odbywa się po 4 kategoriach operacji akustycznych. W powyższych wyrażeniach przyjęto że:

$$\hat{X}_k = \frac{1}{n^{(k)}} \sum_{j=1}^{n^{(k)}} 10^{0.1 \cdot L_{AE}^{(j,k)}}. \quad (12.7)$$

Łącząc wzory (12.1), (12.2) oraz (12.5) otrzymujemy równanie, z którego można obliczyć standardową niepewność złożoną typu A dla wskaźnika \hat{L}_{DWN} ,

$$u_{cA}(e) = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\tilde{N}_D^{(k)})^2 \cdot u_A(e_k)^2 + \frac{5}{18} \sum_{k=1}^4 (\tilde{N}_W^{(k)})^2 \cdot u_A(e_k)^2 + \frac{100}{9} \sum_{k=1}^4 (\tilde{N}_N^{(k)})^2 \cdot u_A(e_k)^2}. \quad (12.8)$$

Analogicznie postępujemy przy obliczaniu standardowej niepewności złożonej wskaźnika \hat{L}_N zastępując równanie (12.5) formułą (12.6),

$$u_{cA}(e) = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (\tilde{N}_N^{(k)})^2 \cdot u_A(e_k)^2}. \quad (12.9)$$

Ostatecznie, niepewność rozszerzoną obu wskaźników długookresowych oblicza się ze wzoru

$$U_{A,95}(e) = t_{95}(v) \cdot u_{cA}(e), \quad (12.10)$$

gdzie $t_{95}(\nu)$ to współczynnik rozszerzenia wyznaczony z rozkładu t-Studenta dla odpowiedniego stopnia swobody ν . Niepewność typu A wyrażoną w skali logarytmicznej dają wzory,

$$\begin{aligned}
 U_{A,95}^{-}(L) &= 10 \cdot \log \left\{ 1 - \frac{U_{A,95}(e)}{10^{0.1 \cdot \hat{L}_{DWN}}} \right\}, \\
 U_{A,95}^{-}(L) &= 10 \cdot \log \left\{ 1 - \frac{U_{A,95}(e)}{10^{0.1 \cdot \hat{L}_N}} \right\},
 \end{aligned}
 \tag{12.11}$$

oraz

$$\begin{aligned}
 U_{A,95}^{+}(L) &= 10 \cdot \log \left\{ 1 + \frac{U_{A,95}(e)}{10^{0.1 \cdot \hat{L}_{DWN}}} \right\}, \\
 U_{A,95}^{+}(L) &= 10 \cdot \log \left\{ 1 + \frac{U_{A,95}(e)}{10^{0.1 \cdot \hat{L}_N}} \right\}.
 \end{aligned}
 \tag{12.12}$$

13. Weryfikacja metody estymacji wskaźników długookresowych L_{DWN} i L_N

13.1. Opis metody estymacji

Zbierając wnioski z poszczególnych eksperymentów można sformułować następujące zalecenia, które stanowią będą metodę estymacji wskaźników długookresowych L_{DWN} i L_N bazującą na krótkotrwałych pomiarach wartości krótkookresowych L_{AE} .

Aby estymowane wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N nie różniły się od rzeczywistych o więcej niż ± 1.5 dB, należy przestrzegać reguł dotyczących gromadzenia wartości L_{AE} . Zbiór wartości ekspozycyjnych hałasu powinien zawierać wyniki pomiarów z kilku, co najmniej 4 sesji pomiarowych, oddalonych od siebie w czasie o minimum 30 dni. Moc zbioru wartości L_{AE} powinna przekraczać 80 elementów. Przy obliczaniu wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N należy uwzględnić podział danych (wartości L_{AE}) na 4 następujące kategorie wydarzeń akustycznych:

- starty samolotów turbośmigłowych i tłokowych – **kategoria 1**,
- starty samolotów z silnikiem turbowentylatorowym o MTOW < 60 ton – **kategoria 2**,
- starty samolotów z silnikiem turbowentylatorowym o MTOW \geq 60 ton – **kategoria 3**,
- lądowania samolotów – **kategoria 4**.

Aby prawidłowo określić wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N niezbędna jest również dokładna informacja o średniej w roku liczbie operacji statków powietrznych należących do danej kategorii, z podziałem na kierunki operowania oraz pory doby. Ze względu na definiowane z rocznym wyprzedzeniem siatki połączeń liczby te nie są trudne do uzyskania od zarządzającego lotniskiem.

13.2. Weryfikacja metody

Do weryfikacji przedstawionej metody estymacji wskaźników długookresowych, wraz z szacowaniem niepewności, wykorzystano dane z punktów pomiarowych P3, P4 oraz P5 (rys.5.3). Wartości średnioroczne w tych punktach nie zostały jednak zmierzone bezpośrednio. Określono je na podstawie przybliżeń (5.1) - (5.3) oraz wzorów (3.6) i (2.13). Dodatkowo dla tych punktów wykonano obliczenia w programie INM, które dały wyniki zbliżone do tych określonych na podstawie pomiarów. W Tab.13.1 raz jeszcze przytoczono prawdziwe wartości wskaźników średniorocznych w roku 2012 dla wszystkich punktów: P1, P2, P3, P4 oraz P5.

Tab.13.1. Wartości wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w 5-ciu punktach pomiarowych.

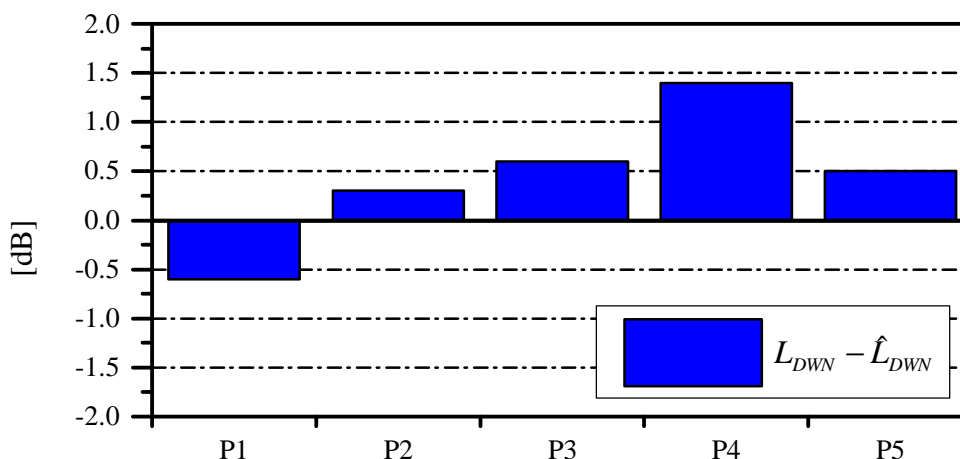
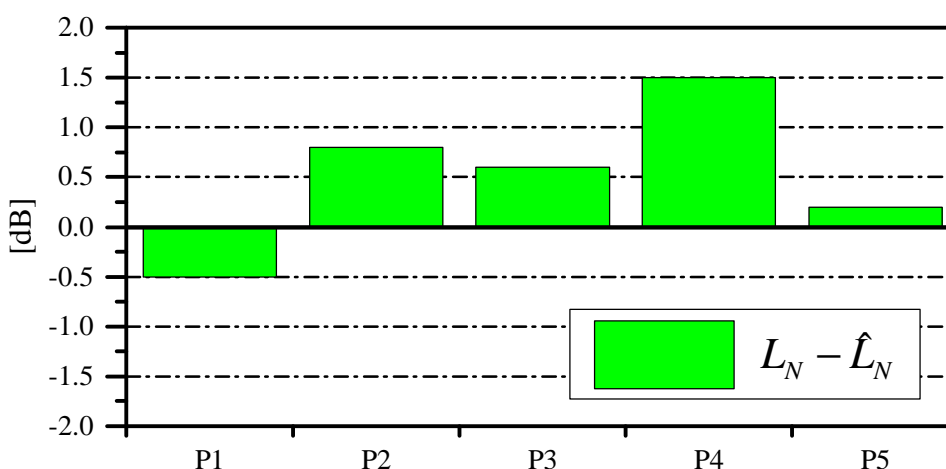
Punkt pomiarowy	L_{DWN} [dB]	L_N [dB]
P1	64.2	55.6
P2	56.6	49.0
P3	59.9	51.2
P4	55.7	48.0
P5	61.7	53.0

W niniejszej pracy wykazano, że wartości \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N dobrze estymują wskaźniki długookresowe, kiedy liczebność próby jest większa lub równa 80 (rys.11.1). Weryfikacji dokonano zatem dla zbioru o liczebności $n = 100$. Odstępy między czterema wirtualnymi sesjami pomiarowymi wynosiły więcej niż 30 dni. Należy zwrócić uwagę, że dane pomiarowe, które mamy do dyspozycji w punktach P3 – P5 nie pokrywają okresu całego roku (tab.5.1). Nie wpływa to jednak na możliwość wykorzystania metody estymacji z tego względu, że pomiary w tych punktach wykonywane były w różnych miesiącach. Oprócz wirtualnych pomiarów w czterech różnych dniach, w odpowiednich odstępach czasowych, zgodnie z zaleceniami dane podzielono na cztery kategorie wydarzeń akustycznych. Do obliczeń wskaźników długookresowych przyjęto dane ruchowe podane w tab.9.1, zaś ich wyniki zestawiono w tab.13.2. W tabeli tej oprócz wartości estymowanych, podano niepewności typu A estymacji (wartości w nawiasach), które obliczono na podstawie metody przedstawionej w rozdziale 12.

Tab.13.2. Wartości estymowanych wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N w 5-ciu punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy	\hat{L}_{DWN} [dB]	\hat{L}_N [dB]
P1	64.8 (-0.2;0.2)	56.1 (-0.3;0.3)
P2	56.3 (-0.2;0.2)	48.2 (-0.3;0.3)
P3	59.3 (-0.2;0.2)	50.6 (-0.2;0.2)
P4	54.3 (-0.5;0.4)	46.5 (-0.8;0.7)
P5	61.2 (-0.2;0.2)	52.8 (-0.3;0.3)

Na Rys.13.1 oraz 13.2 przedstawiono różnice pomiędzy wartościami rzeczywistymi a estymowanymi. Jak widać wartości otrzymane w oparciu o pomiary różnią się nieznacznie od wartości prawdziwych.

Rys.13.1. Różnice pomiędzy wartościami rzeczywistymi L_{DWN} a estymowanymi \hat{L}_{DWN} w punktach pomiarowychRys.13.2. Różnice pomiędzy wartościami rzeczywistymi L_N a estymowanymi \hat{L}_N w punktach pomiarowych

W żadnym punkcie pomiarowym wartość estymowana nie różniła się od wartości prawdziwej o więcej 1.5 dB. Świadczy to o tym, że przedstawiona metoda sprawdza się również w punktach oddalonych nieco dalej od lotniska (P3 – P5).

14. Podsumowanie i wnioski

W przedstawionej rozprawie doktorskiej wykazano, że możliwe jest estymowanie wskaźników długookresowych (\hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N) w oparciu o wyniki pomiarów hałasu pojedynczych operacji lotniczych tj. poziomy ekspozycyjne hałasu L_{AE} .

Duży zbiór danych dotyczących hałasu lotniska w Poznaniu pozwolił na wielostronną analizę statystyczną oraz na wiele symulacji. W ramach pracy wykonano trzy eksperymenty komputerowe przeplatane analizami wspomagającymi, których celem było wyeliminowanie niekorzystnych zjawisk. W pierwszym eksperymencie zaproponowano najprostszą z możliwych sytuację pomiarową, kiedy to mierzy się n kolejnych wydarzeń akustycznych. Następnie z otrzymanego zbioru L_{AE} estymowane były wskaźniki długookresowe \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N . Symulacje pokazały, że dopiero dla liczby $n = 1400$ rejestrowanych wartości L_{AE} możliwe jest uzyskanie zakładanego rozrzutu wyników ± 1.5 dB, co nie jest wynikiem satysfakcjonującym. Przyczynę takiego stanu rzeczy można wytłumaczyć dużym zróżnicowaniem wartości L_{AE} , co w konsekwencji prowadzi do niereprezentatywności próby w trakcie losowania. Kształty funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla całej populacji L_{AE} zasugerowały istnienie kilku kategorii wydarzeń akustycznych. Analiza danych pozwoliła zidentyfikować cztery kategorie wydarzeń akustycznych. Zastosowanie idei kategoryzacji operacji lotniczych w trakcie eksperymentu II (rozdział 9) pozwoliło zmniejszyć rozrzut wyników losowań. Nadal jednak nie osiągnięto zakładanego minimalnego rozrzutu wynoszącego 3 dB, choć zmniejszono prawie trzykrotnie, w stosunku do eksperymentu I, liczebność zbioru przy której taki wynik jest możliwy do osiągnięcia. Dopiero analiza zmienności w czasie średnich wartości L_{AE} pozwoliła odpowiedzieć na pytanie co jest przyczyną rozrzutów większych niż 3 dB dla prób o małej mocy zbioru rzędu $n = 80 - 100$. Biorąc pod uwagę miesięczne zmiany wartości wskaźników krótkookresowych, stwierdzono, że w miesiącach letnich poziomy rejestrowane dla samolotów z kategorii 3 są większe od pozostałych. Połączono ten fakt z dużą liczbą pasażerów w tym okresie. Uwzględniając zmienność czasową ekspozycyjnych poziomów hałasu L_{AE} wykonano eksperyment 3 (rozdział 11), podczas którego udało się zmniejszyć rozrzut poniżej 3 dB. W ostatniej części pracy przedstawiono sposób obliczania niepewności estymowanych wskaźników długookresowych.

Opisane eksperymenty pozwoliły osiągnąć cele postawione we wstępie pracy oraz udowodnić jej tezę która brzmi:

Wyniki monitoringu hałasu lotniczego, określone wskaźnikiem krótkookresowym L_{AE} , mogą posłużyć do weryfikacji wskaźników długookresowych L_{DWN} i L_N oraz do weryfikacji dokumentów na nich opartych np. map akustycznych.

Novum tej pracy jest opracowanie metody, która mówi jak należy wykonywać krótkotrwałe pomiary aby estymowane na ich podstawie wartości średnioroczne były porównywalne z wartościami rzeczywistymi. W metodzie tej określono liczebność oraz zawartość zbioru wartości L_{AE} pozwalające na szybką i zadowalającą estymację wskaźników długookresowych. Wykazano, że już około 100 wartości krótkookresowych zebranych w 4 sesjach pomiarowych oddalonych od siebie o 30 dni daje wynik różniący się od rzeczywistej wartości średniorocznej o mniej niż ± 1.5 dB. Jest to możliwe tylko wówczas kiedy dane z monitoringu krótkoterminowego podzielone zostaną na cztery kategorie wydarzeń akustycznych.

W ramach dysertacji empirycznie zweryfikowano także działanie tej metody w punktach pomiarowych, których nie wykorzystywano w trakcie przygotowania metody. Okazało się, że również w nich udało się skutecznie estymować wskaźniki średnioroczne w oparciu o przyjęty scenariusz kilku sesji pomiarowych. Udowodniono tym samym, że metoda estymacji znajduje zastosowanie w punktach pomiarowych rozmieszczonych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [20]. W ostatniej części pracy przedstawiono metodę obliczania niepewności, dla wskaźników \hat{L}_{DWN} oraz \hat{L}_N zgodnie z wytycznymi podanymi w *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [47].

Należy podkreślić, że zaproponowana w niniejszej pracy metoda jest prosta do implementacji praktycznej. Wymaga ona jedynie informacji o planowanym rocznym rozkładzie lotów oraz wykonania pomiarów L_{AE} z uwzględnieniem typów samolotów. Na podstawie pomiarów L_{AE} wykonanych zgodnie z tą metodą możliwe jest estymowanie wskaźników długookresowych L_{DWN} oraz L_N . Metoda ta wraz ze sposobem liczenia niepewności, może być z powodzeniem zaimplementowana w np. w Rozporządzeniu

Ministra Środowiska [20], które dotyczy oceny hałasu lotniczego w środowisku, a które nie określa jak wykonywać monitoring hałasu w oparciu o wskaźniki L_{DWN} oraz L_N .

Streszczenie

Rozwój cywilizacyjny niesie za sobą wzrost poziomu hałasu w otoczeniu. Wprowadzanych jest wiele regulacji dotyczących problemu hałasu. Jedną z nich jest dyrektywa Unii Europejskiej 2002/49/WE. Wymaga ona aby także dla hałasu lotniczego, wyznaczać wskaźniki średnioroczne L_{DWN} oraz L_N w postaci mapy akustycznej. Mapy akustyczne oraz inne dokumenty tworzy się w oparciu o modele komputerowe. W przypadku hałasu lotniczego służy do tego model ECAC.CEAC Doc. 29. zaimplementowany w programie INM. Pozwala on zgodnie z definicją określić średnioroczne wskaźniki L_{DWN} oraz L_N . Często określone w ten sposób wskaźniki wymagają weryfikacji. Pomiarowe sprawdzenie tych wartości jest możliwe, jednakże czasochłonne ze względu na to, że pomiary należałoby wykonywać przez cały rok. W niniejszej pracy przedstawiono metodykę, bazującą na pomiarach krótkotrwałych wartości L_{AE} , która pozwala znacząco skrócić czas wykonywania tych pomiarów. W pracy założono, że różnica pomiędzy wartością estymowaną a prawdziwą średnioroczną nie powinna przekraczać ± 1.5 dB. W tym celu przeprowadzono szeroką analizę statystyczną danych obejmującą wyniki pomiarów całorocznych dokonanych na jednym z polskich lotnisk. W pracy wykazano, że przy odpowiednim grupowaniu statków powietrznych oraz wykonywaniu pomiarów w określonych interwałach czasowych, uzyskanie zakładanego rozrzutu jest możliwe. Już 100 wartości ekspozycyjnego poziomu hałasu L_{AE} zarejestrowanych w kilku sesjach pomiarowych przeprowadzonych w odstępie 30 dni od siebie pozwala określić wartość średnioroczną nie przekraczając zakładanej różnicy ± 1.5 dB. Prawidłowość ta dotyczy różnych lokalizacji punktów pomiarowych i jest powtarzalna. Dodatkowo w pracy przedstawiono metodykę obliczania niepewności uwzględniającą kategoryzację wydarzeń akustycznych bazującą na wytycznych podanych w GUM.

Summary

The development of civilization is a cause of increasing noise level in environment. There are many legislations about noise pollution. One of them is the European Union Directive 2002/49/EC. It requires preparing noise maps based on yearly average long-term indicators L_{DEN} and L_N also for aircraft noise. Acoustic maps and others documents are created in software which use a mathematical model. For aircraft noise ECAC.CEAC Doc . 29 model is used and it is implemented in INM software. In this software it is possible to calculate L_{DEN} and L_N according to the definition. Usually, however, this calculation needs measurements verification. This verification is possible by measuring noise level during whole year, nevertheless this kind of long-lasting measurements is still too long and expensive. In this thesis shorter method which bases on short-term indicators was introduced. The study assumed that the difference between the estimated value and the true annual average should not differ by more than ± 1.5 dB. The wide statistical analysis of one-year measurement results from one of Polish airport was performed. The study revealed that it is possible to achieve the assumed scattering of results when the short-term results are grouped according to different aircraft and the measurement are proceeded a certain time intervals. Just 100 of sound exposure noise level recorded in several sessions carried out at an interval of 30 days from each other allows to predict the value of the annual average that does not exceed the assumed difference from real value. It must be stressed that this solution can be applied to different locations of measuring points and is reproducible. Furthermore, the methodology of the uncertainty calculation is presented here. Finally, this method include categorization of acoustic events and it is consistent with guidelines given in the GUM .

Załącznik 1 – objaśnienie nazw skróconych samolotów wg. ICAO

Typ statku	Pełna nazwa
B738	Boeing 737-800
A320	Airbus A320
AT7	Aerospatiale ATR-72-200
DH8D	De Havilland Canada Dash 8
B734	Boeing 737-400
AT4	Aerospatiale ATR-42-300
CRJ2	Canadair Regional Jet 200
CRJ7	Canadair Regional Jet 700
SF34	SAAB 340
E170	Embraer 170
C525	Cessna 525A
SR22	Cirrus SR22
CRJ9	Canadair Regional Jet 900
PA34	Piper PA.34
SR20	Cirrus SR20
B190	Beech 1900
BE9L	Beech C90B King Air
E175	Embraer 175
C56X	Cessna 560
C172	Cessna 172
P180	Piaggio P-180 Avanti

Literatura

- [1] *Analiza rynku transportu lotniczego w 2012 roku w Polsce*, Urząd Lotnictwa Cywilnego, Warszawa, Październik 2012
- [2] Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku
- [3] K. Poland, V. Mellert, R. Weber, *Environmental noise directive – some comparisons of calculations with long-term measurements*, , Euronoise 2009, Edinburg
- [4] IMAGINE, *Determination of L_{den} and L_{night} using measurement*, IMA32TR-040510-SP08
- [5] M. Ausejo, M. Recuero, C. Asensio, *Study of uncertainty in noise mapping*, Internoise 2010, Lizbona
- [6] M. Arana, R. San Martin, I. Nagore, D. Perez, *Using noise mapping to evaluate the percentage of people affected by noise*, Acta Acustica United with Acustica, 95, 550-554, 2009
- [7] M. Arana, R. San Martin, I. Nagore, D. Perez, *Uncertainty in noise mapping versus precision in the digital terrain model*, Internoise 2010, Lizbona
- [8] ISO 1996-1:1982, Acoustics – *Description and measurement of Environmental noise – Part I: Basic quantities and procedures* (ISO Standards Handbook, Geneve, 1995) vol. 1.
- [9] R. Makarewicz, *Hałas w środowisku*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1996
- [10] ISO 226:2003, *Acoustics - Normal equal-loudness-level contours*
- [11] A. Dobrucki, *Przetworniki elektroakustyczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [12] T. Schultz, *Community noise rating*, Applied Science Publishers, Londyn 1982

-
- [13] L.L. Beranek, „*Basic Acoustical quantities: levels and decibels*, John Wiley&Sons, New York 1992
- [14] ISO 20906, *Acoustics – Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports*
- [15] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 stycznia 2014 w sprawie *dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku*
- [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 czerwca 2007 w sprawie *ustalania wartości wskaźnika L_{DWN}*
- [17] E. Boeker, E. Dinges, G. Fleming, Ch. Roof, A. Rapoz, J. Hemann, *Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 Technical Manual*, FAA Office of Environment and Energy, styczeń 2008
- [18] I-INCE Final Report “*Survey Of Legislation, Regulations, And Guidelines For Control Of Community Noise*”, International Institute of Noise Control Engineering, 2009
- [19] K. Jones, R. Cadoux, *ERCD Report 0904 - Metrics for Aircraft Noise*, Environmental Research and Consultancy Department, styczeń 2009
- [20] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 w sprawie *wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem*
- [21] Y.Tadahira, K. Yamashita, S Ohashi, *Unattended monitoring technique for identifying the aircraft noise: the method for correlating the observed aircraft noise with an airport mode and an aircraft operation*, Internoise 2007, Istanbul
- [22] R. C. Muchall, Experiences with an intelligent measurement system for monitoring aircraft noise without radar assistance, Internoise 2001, Haga
- [23] Y.Toyoda, J. Huang, S.X. Ding ,Y. Liu, *Environmental sound recognition by the instantaneous spectrum combined with the time pattern of power*, Neural Networks and Computational Intelligence, 169-172, (2004)

-
- [24] M. Kłaczyński, T. Wszolek. W. Batko, *A statistical approach in detection of noise events to aircraft noise assessment*, 59th Open Seminar on Acoustics, Boszkowo, 2012
- [25] W. Wszolek, M. Kłaczyński, *Recognition of aircraft noise in long-term environmental monitoring*, *Mechanics and Control*, 29 (4), 192 – 197, (2010)
- [26] C. Asensio , M. Ruiz, M. Recuero, *Real-time aircraft noise likeness detector*, *Applied Acoustics*, 71, 539 – 545, 2010
- [27] J.E. Wesler, *Community noise survey of Medford, Massachusetts*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 54, 985 - 995 , (1973)
- [28] T.J. Schultz, *Some sources of error in community noise measurement*, *Journal of Sound and Vibration*, 6, 18 – 27, (1972)
- [29] H.B. Safeer, J.E. Wesler, E.J Rickley, *Errors due to sampling in community noise level distribution*, *Journal of Sound and Vibration*, 24(3), 365-376, (1972)
- [30] D. Skarlatos, P. Drakatos, *On selecting the minimum observation time for determining the Leq of a random noise with a given level of confidence*, *Journal of Sound and Vibration*, 152 (1), 141 – 148, (1992)
- [31] C. Larsson, *A method for determining the long-term aircraft noise level from short-term measurements*, 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, 1995
- [32] P.D. Schomer, R.E. DeVor, *Temporal sampling requirements for estimation of long-term average sound levels in the vicinity of airports*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 69(3), 713 – 719, (1981)
- [33] E.Gaja, A. Gimenez, S. Sancho, A.Reig, *Sampling techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions*, *Applied Acoustics*, 64, 45 – 53, (2003)
- [34] P. Mioduszewski, J. Ejsmont, J. Grabowski, D. Karpiński, *Noise map validation by continuous noise monitoring*, *Applied Acoustics*, 72(8), 582-589, (2011)
- [35] J.M. Barrigon Morillas, C. Prieto Gajardo, *Uncertainty evaluation of continuous noise sampling*, *Applied Acoustics*, 75, 27-36, (2014)

-
- [36] R. Makarewicz, M. Gałuszka, *Approximation of the Yearly Average Sound Level Based on the Sound Exposure Levels*, Acta Acustica united with Acustica, 96(5), 981 – 984, (2010)
- [37] R. Makarewicz, M. Gałuszka, *Empirical revision of noise mapping*, Applied Acoustics, 72(8), 578– 581, (2011)
- [38] K. Poland, V. Mellert, R. Weber, *Environmental noise directive – some comparisons of calculations with long-term measurements*, Euronoise 2009, Edinburg
- [39] C.G. Don, I.G. Riss, *Road traffic sound level distributions*, Journal of Sound and Vibration, 100(1), 41 – 53, (1985)
- [40] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, J. Defrance, *Capturing urban traffic noise dynamics through relevant descriptors*, Applied Acoustics, 69 (12), 1270 – 1280, (2008)
- [41] A.J. Torija, P.D. Ruiz, A. Ramos, *Characterization of the different types of vehicles flow in traffic*, 19th International Congress on Acoustics, 2007, Madrid
- [42] A. Garcia, L.J. Faus, *Statistical Analysis of Noise Levels in Urban Areas*, Applied Acoustics, 34, 227 – 247, (1991)
- [43] R. Turek, *Wpływ fluktuacji parametrów ruchu na hałas drogowy*, praca magisterska, Poznań 2007
- [44] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, J. Defrance, *Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidence*, Applied Acoustics, 70, 821-829, (2009)
- [45] T. Wszolek, M. Kłaczyński, *Effect of traffic noise statistical distribution on L_{AeqT} measurement uncertainty*, Archives of Acoustics, 31(4), 311-318, (2006)
- [46] S. White, J.B. Ollerhead, R.E. Cadoux, M.J.T. Smith, *ERCD REPORT 0205, Quota Count Validation Study: Noise Measurements and Analysis*, 2003
- [47] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization, 1993

-
- [48] L.M. Caligiuri, *The evaluation of uncertainty in environmental acoustic measurements according to the ISO 'Guide'*, Noise Control Engineering Journal, 55(1),116 – 132, (2007)
- [49] P.R. Bevington, D. K. Robinson, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, McGraw-Hill, 2002
- [50] P. Kulczycki, *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [51] H.W. Lilliefors, *On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown*, Journal of the American Statistical Association, 62, 399 – 402, 1967
- [52] M.S. Srivastava, *A measure of skewness and kurtosis and a graphical method for assessing multivariate normality*, Statistics & Probability Letters, 2 (5), 263 – 267, 1984
- [53] ICAO - *DOC 8643 - Aircraft Type Designators*
- [54] A. Stanisiz, *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*, StatSoft Polska, Kraków 2006
- [55] R. Makarewicz, *Dźwięk w Środowisku*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1994
- [56] *Making Future Commercial Aircraft Quieter*, NASA Facts, National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center, FS-1999-07-003-GRC

Publikacje i referaty autora pracy

Publikacje recenzowane w czasopismach o zasięgu międzynarodowym

- [1] R. Makarewicz, M. Gałuszka, P. Kokowski, *Evaluation of aircraft noise measurements*, Noise Control Engineering Journal, przyjęte do druku – kwiecień 2014.
- [2] R. Makarewicz, M. Gałuszka, Nonlinear uncertainty of the long term average level calculated from short term average sound levels, Noise Control Engineering Journal 60, 6, (2012)
- [3] R. Makarewicz, M. Gałuszka, R. Gołębiewski, P. Kokowski - *A study on the influence of humps on road traffic noise*, Acoustical Science & Technology, 33, 5 (2012)
- [4] R. Makarewicz, M. Gałuszka, *Empirical revision of noise mapping*, Applied Acoustics (2011), 72, 578– 581
- [5] R. Makarewicz, M. Gałuszka, *Road traffic noise prediction based on speed flow diagram*, Applied Acoustics (2011), 72, 190–195
- [6] R. Makarewicz, M. Gałuszka, *Approximation of the Yearly Average Sound Level Based on the Sound Exposure Levels*, Acta Acustica united with Acustica (2010), 96, 981 – 984

Referaty

- [1] M. Gałuszka, *Statistical distributions of levels and energy of aircraft noise*, 59. Otwarte Seminarium z Akustyki w Boszkowie, 10-14 września 2012 – III nagroda w konkursie im. Marka Kwieka
- [2] M. Gałuszka, *Rozkłady statystyczne energii i poziomów hałasu drogowego*, I Międzynarodowa Konferencja Monitoring Środowiska, 24-25 maja 2010, Kraków

Oświadczenie

Ja, niżej podpisany Michał Gałuszka, doktorant Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oświadczam, że przedkładaną rozprawę doktorską pt. *„Krótko- i długookresowe wskaźniki oceny hałasu lotniczego”* napisałem samodzielnie. Oznacza to, że przy pisaniu pracy, poza niezbędnymi konsultacjami, nie korzystałem z pomocy innych osób, a w szczególności nie zlecałem opracowania rozprawy lub jej istotnych części innym osobom, ani nie odpisywałem tej rozprawy lub jej istotnych części od innych osób.

Równocześnie wyrażam zgodę na to, że gdyby powyższe oświadczenie okazało się nieprawdziwe, decyzja o nadaniu mi stopnia naukowego doktora zostanie cofnięta.

Michał Gałuszka

Poznań, 5 maja 2014