



Politechnika Gdańska
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Katedra Systemów Multimedialnych

Rozprawa doktorska

OCENA WPŁYWU ZAGROŻEŃ
HAŁASOWYCH NA CZĘSTOŚĆ
WYSTĘPOWANIA CHORÓB SŁUCHU
Z ZASTOSOWANIEM ŚRODKÓW
TELEINFORMATYCZNYCH

mgr inż. Józef Kotus

prof. dr hab. inż. Bożena Kostek, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej

Gdańsk 2007

Podziękowania

Autor niniejszej rozprawy pragnie złożyć serdeczne podziękowania wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania niniejszej pracy. W szczególności pragnie podziękować Pani Promotor prof. dr hab. inż. Bożenie Kostek za trud długich dyskusji merytorycznych i żmudnej poprawy tekstu oraz prof. zw. dr hab. inż. Andrzejowi Czyżewskiemu za pomoc w opracowaniu zaprezentowanych w rozprawie rozwiązań konstrukcyjnych.

Niniejsza rozprawa została dofinansowana w ramach projektów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: badawczego nr 3T11E02829 i badawczo-rozwojowego nr R0201001 oraz ze środków działalności statutowej Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu w Warszawie.

Podziękowanie kieruję również do całego zespołu współpracowników Katedry Systemów Multimedialnych za koleżeńską pomoc oraz dla Rodziny za okazane wsparcie.

Objaśnienie najważniejszych skrótów i symboli

KSM – Katedra Systemów Multimedialnych

TTS – ang. *Temporary Threshold Shift*, czasowe przesunięcie progu słyszenia

ATS – ang. *Asymptotic Threshold Shift*, asymptotyczne przesunięcie progu słyszenia

PTS – ang. *Permanent Threshold Shift*, trwałe przesunięcie progu słyszenia

SEL – ang. *Sound Exposure Level*, ekspozycyjny poziom dźwięku

NIHL – ang. *Noise Induced Hearing Loss*, ubytki słuchu wywołane hałasem

L_{Aeq} – równoważny poziom dźwięku, korygowany według charakterystyki A

EEH – ang. *Equal Energy Hypothesis*, hipoteza równoważności energii

DPOAE – ang. *Distortion Product Otoacoustic Emissions*, otoemisje akustyczne produktów zniekształceń nieliniowych ślimaka

MSMH – Multimedialny System Monitorowania Hałasu

PDH – Psychoakustyczny Dozymetr Hałasowy

XML – ang. *Extensible Markup Language*, język XML

L_{JK} – wskaźnik szkodliwości hałasu zaproponowany przez autora niniejszej rozprawy, wartość bezwzględna

D_{JK} – wskaźnik szkodliwości hałasu zaproponowany przez autora niniejszej rozprawy, wartość względna wyrażająca dzienną dawkę

f - częstotliwość

Spis Treści:

1. Wprowadzenie.....	6
2. Współczesne metody oceny hałasu	11
2.1. Podstawowe pojęcia i wskaźniki oceny hałasu.....	11
2.2. Przepisy prawa w walce z hałasem.....	19
2.2.1. Polityka przeciwhałasowa UE	19
2.2.2. Dostosowanie polskiego prawa do wymogów UE	21
2.2.3. Ocena ryzyka uszkodzenia słuchu	23
2.2.4. Analiza dozymetryczna.....	24
3. Stan zagrożenia i skutki oddziaływania hałasu.....	28
3.1. Oddziaływanie hałasu na człowieka	29
3.2. Ubytki słuchu wywołane hałasem	34
3.2.1. Czasowe zmęczenie słuchu – TTS.....	34
3.2.2. Trwały ubytek słuchu – PTS.....	37
3.3. Hipoteza równoważności energii.....	38
4. Metody pomiaru ubytków słuchu.....	41
4.1. Metody subiektywne.....	41
4.1.1. Audiometria tonalna	41
4.1.2. Audiometria mowy	42
4.2. Metody obiektywne	43
4.2.1. Otoemisja akustyczna	43
4.3. Badania przesiewowe	47
4.3.1. Multimedialny system przesiewowych badań słuchu „Słyszę...”	48
4.3.2. Gromadzenie i wizualizacja danych epidemicznych.....	50
5. Multimedialny system monitorowania hałasu	52
5.1. Ogólne założenia projektowe systemu	53
5.2. Architektura systemu	54
5.3. Stacja pomiarowa.....	56
5.3.1. Budowa	56
5.3.2. Działanie	58
5.3.3. Wyznaczane parametry hałasu.....	59
5.3.4. Badanie stacji.....	63
5.4. Protokoły komunikacji.....	64
5.5. Baza danych multimedialnego systemu monitorowania hałasu	67
5.6. Sposoby wizualizacji wyników	71
6. Badania wpływu hałasu na stan słuchu w wybranych obszarach aktywności..	75
6.1. Metodologia prowadzonych badań.....	75
6.1.1. Pomiary hałasu.....	76
6.1.2. Pomiary słuchu	77
6.1.3. Organizacja czasowa przeprowadzonych pomiarów słuchu.....	79
6.1.4. Badania ankietowe	80
6.2. Analizowane obszary aktywności.....	80
6.3. Wyniki pomiarów hałasu	83
6.4. Wyniki pomiarów słuchu metodą audiometrii tonalnej.....	88
6.5. Wyniki pomiarów słuchu metodą DPOAE.....	96
6.6. Wyniki badań ankietowych przeprowadzonych w szkołach	101
6.7. Analiza dozymetryczna.....	103
6.8. Podsumowanie i wnioski	105

7. Psychoakustyczny Dozymetr Hałasowy	107
7.1. Modelowanie skutków ekspozycji na hałas	109
7.1.1. Funkcja przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego	109
7.1.2. Pasma krytyczne	110
7.1.3. Filtry słuchowe	111
7.1.4. Poziom ATS.....	113
7.1.5. Narastanie i zanikanie procesu TTS	115
7.1.6. Refleks akustyczny	118
7.1.7. Mechanizm strukturalny	119
7.2. Wyznaczanie stałych czasowych narastania i opadania efektu TTS	121
7.2.1. Czynniki metaboliczne	121
7.2.2. Czynniki strukturalne.....	125
7.2.3. Podejście kompleksowe	128
7.3. Weryfikacja PDH w rzeczywistych warunkach ekspozycji	130
7.4. Propozycja nowych wskaźników dozymetrii hałasowej	133
7.5. Weryfikacja eksperymentalna zaproponowanych wskaźników	136
7.5.1. Analiza sygnałów o jednakowym poziomie równoważnym	138
7.5.2. Procentowe uszkodzenie słuchu	141
8. Wnioski	146
9. Bibliografia	148
10. Załączniki	165
10.1. Załącznik 1	166
10.2. Załącznik 2.....	179
10.3. Załącznik 3.....	181
10.4. Załącznik 4.....	188
10.5. Załącznik 5.....	192
10.6. Załącznik 6.....	196
10.7. Załącznik 7.....	202

1. WPROWADZENIE

Cele zrealizowanej rozprawy obejmują zagadnienia związane ze zmniejszeniem występowania chorób słuchu, upowszechnieniem wiedzy z zakresu wpływu hałasu na słuch, upowszechnieniem nowego sposobu pomiarów hałasu i oceny jego szkodliwego oddziaływania na słuch oraz udostępnieniem wyników pomiarów dla społeczeństwa.

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii informacyjnych. Dotyczy to przede wszystkim Internetu, łączności bezprzewodowej oraz upowszechnienia komputerów, zwłaszcza multimedialnych. Stwarza to możliwość zastosowania nowych technologii również w powszechnej diagnostyce słuchu i systemach monitorowania zagrożeń hałasem [25][37]. Koncentracja wysiłków zmierzających do opracowania łatwych w użyciu i skutecznych narzędzi diagnostycznych jest jednym z głównych obszarów prac prowadzonych w Katedrze Systemów Multimedialnych. Motywem do działania w tym zakresie są wciąż liczne i alarmujące sygnały dotyczące stanu słuchu społeczeństwa, a zwłaszcza dzieci i młodzieży oraz klimatu akustycznego w kraju. Począwszy od lat 90. prowadzono liczne, kompleksowe badania narządu słuchu wśród dzieci i młodzieży ze szkół i uczelni. Badania te wykazały ubytki słuchu u około 1/3 badanych na poziomie przekraczającym 20 dB HL [91]. Badania rozpoczęte przed 1999 r. przez Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu potwierdziły ten alarmujący stan. Zebrane dane epidemiologiczne wykazały, że co piąte dziecko w wieku 6–19 lat ma problemy ze słuchem. Skala i waga tego problemu jest na tyle duża, że badaniem takim powinna być objęta grupa około 7 milionów dzieci i młodzieży [39][183]. Wykonanie dokładnych badań słuchu na taką skalę jest zadaniem zarówno trudnym, jak i kosztownym. Z tego względu, w Katedrze Systemów Multimedialnych we współpracy z Instytutem Fizjologii i Patologii Słuchu, opracowano nowatorskie narzędzia diagnostyczne, umożliwiające przeprowadzenie wiarygodnych, przesiewowych testów słuchu [37][40]. Narzędzia te pozwalają na wcześniejsze wykrycie zaburzeń – nie tylko słuchu, ale i mowy, wzroku oraz rozpoczęcie leczenia czy rehabilitacji [36][37][183].

Wykonane prace, zmierzające do wykrycia zaburzenia narządu słuchu, umożliwiają podjęcie czynności zmierzających do ogólnej poprawy stanu zdrowia. Nie likwidują jednak przyczyny powstawania tych zaburzeń. Przyczyn tych jest bardzo wiele, zaliczyć do nich należy: przebyte choroby, terapie farmakologiczne (głównie antybiotykowe), czy np. urazy mechaniczne [82][191]. Jest jednak faktem bezspornym,

że w przypadku dużej części badanych dzieci i młodzieży, ubytki te są skutkiem nadmiernej ekspozycji na głośne dźwięki. Jako ich źródło należy wymienić: przenośne odtwarzacze dźwięku, systemy dźwiękowe domowe i w samochodach oraz uczestniczenie w koncertach muzyki młodzieżowej czy bytność w dyskotekach [28][57][58][70][75][86][88][149][167][184][190][203]. Przyczynia się do tego również rosnący poziom zanieczyszczenia hałasem środowiskowym. Czynnikiem ten określa się jako jedno z poważniejszych zagrożeń cywilizacji [51]. Na podstawie wielu badań prowadzonych w Polsce, m.in. raportu opracowanego przez zespół pod kierunkiem Z. Engela i J. Sadowskiego, można stwierdzić, że znaczna część powierzchni kraju, tj. około 21 % zanieczyszczona jest hałasem pochodzącym głównie od środków transportu. Na hałas o poziomie równoważnym większym niż 60 dBA narażonych jest około 33 % ludności kraju [51]. Z kolei z danych zebranych przez GUS wynika, że około 236 tysięcy pracowników zakładów narażonych jest na hałas na stanowiskach pracy [81]. Nadmierny hałas występuje w szkołach, uczelniach, szpitalach, sanatoriach, a także w środowisku naturalnym [52]. W ciągu ostatniej dekady zanotowano trzykrotny wzrost poziomu hałasu określanego jako „hałas najbliższego sąsiedztwa”.

Przeglądając literaturę związaną z tematem niniejszej rozprawy z ostatnich lat, nasuwa się wniosek, iż istnieje potrzeba zakrojonych na szeroką skalę badań słuchu, obejmujących całą populację ludności narażonej na hałas w ogóle, w tym w szczególności dzieci i młodzieży. Niezwykle potrzebne jest również szerokie propagowanie walki z hałasem [8][65][99][193][209] i zapobieganie skutkom wywołanym ekspozycją na wysoki poziom hałasu [120][121][122][134][141]. Zarysowane potrzeby stanowiły istotną motywację do realizacji systemu, którego zadaniem jest zbieranie informacji o zagrożeniach hałasem o zasięgu ogólnokrajowym [35]. Tym właśnie zagadnieniom jest poświęcona niniejsza rozprawa.

W niniejszej rozprawie przedstawiono projekt i realizację teleinformatycznego systemu monitorowania zagrożeń hałasem o niespotykanej wcześniej funkcjonalności. Niezwykle ważną ze względów praktycznych jest opracowana nowatorska koncepcja psychoakustycznej dozymetrii hałasowej [38][105][108]. Poświęcono jej znaczną część niniejszej rozprawy. Koncepcja ta opiera się na odmiennym podejściu do problematyki związanej z oceną szkodliwości hałasu. Polega ona na próbie wyznaczenia skutków słuchowych wywołanych daną ekspozycją na hałas. Możliwe jest zatem zamodelowanie podstawowego następstwa przebywania w nadmiernym hałasie, którym jest czasowe

przesunięcie progu słyszenia. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia wyznaczenie zmiany przesunięcia progu słyszenia oraz określenie charakterystyki powrotu słuchu do stanu początkowego. Na tej podstawie zaproponowano nowe wskaźniki oceny szkodliwości hałasu, które uwzględniają charakter widmowy hałasu oraz sposób dystrybucji energii akustycznej w czasie. Uwzględnienie tych czynników, często pomijanych w procesie wyznaczania dawki hałasu, może pozwolić na wiarygodną ocenę, a co za tym idzie, skuteczną ochronę przed niebezpiecznymi następstwami nadmiernej ekspozycji na hałas.

Zaproponowana przez autora niniejszej rozprawy metoda różni się w sposób zasadniczy od obecnie stosowanej, opartej na poziomie równoważnym korygowanym krzywą A. Główna idea polega na wykorzystaniu wiedzy z zakresu fizjologii i budowy narządu słuchu oraz matematycznego opisu skutków słuchowych wywołanych ekspozycją na dźwięki o odpowiednio wysokim poziomie ciśnienia akustycznego. Wykorzystywana jest informacja o postaci czasowej i częstotliwościowej hałasu. Odrzucono zatem powszechnie przyjmowane założenie, że dźwięk o tej samej energii akustycznej wywołuje jednakowe ryzyko uszkodzenia słuchu. Uzasadnienie do takiego podejścia można znaleźć w badaniach fizjologii narządu słuchu. Doświadczalnie stwierdzono, że region uszkodzenia komórek słuchowych zewnętrznych w narządzie Cortiego jest związany z ekspozycją na hałas [16].

W niniejszej rozprawie przedstawiono szczegółowy opis koncepcji nowego rodzaju dozymetru akustycznego, którego nazwa odzwierciedla zastosowaną wiedzę. Opracowaną metodę zaimplementowano w Psychoakustycznym Dozymetrze Hałasowym (PDH). Koncepcja, implementacja i ocena działania algorytmu PDH stanowi centralną część opracowanej rozprawy doktorskiej. Dokładnie przedstawiono zgromadzony materiał badawczy, wykorzystywany intensywnie na etapie opracowania, a następnie sprawdzenia i weryfikacji prezentowanej koncepcji psychoakustycznej dozymetrii hałasowej. Wątki te stanowią część badawczą rozprawy. Dodatkowym wątkiem przedstawionym w rozprawie było podjęcie wysiłków o charakterze implementacyjnym, zmierzającym do praktycznego wdrożenia opracowanej koncepcji. Dlatego jednym z zadań postawionych w rozprawie doktorskiej było opracowanie systemu teleinformatycznego, którego pełna nazwa brzmi: Multimedialny System Monitorowania Hałasu (MSMH) [108]. Posiada on bardzo rozbudowaną funkcjonalność [109], jednak głównym celem systemu jest monitorowanie warunków akustycznych w sposób ciągły, praktycznie w dowolnym miejscu zarówno w przestrzeni otwartej (hałas

środowiskowy), jak i wewnątrz różnego typu pomieszczeń (np. hałas zawodowy/przemysłowy). Jest to zgodne z aktualnymi uregulowaniami prawnymi, które nakazują walkę z hałasem poprzez opracowywanie wieloletnich strategii w oparciu o mapy hałasu, przedstawiające uśredniony rozkład poziomu dźwięku na analizowanym obszarze za okres całego roku [41][46][197]. Realizację tego zadania umożliwia, z jednej strony opracowany algorytm PDH działający w czasie rzeczywistym, z drugiej zaś - zaprojektowana i wykonana stacja monitorująca.

Podjęciem się realizacji rozprawy doktorskiej, postawiono następujące tezy:

Teza 1

Opracowany system teleinformatyczny pozwala na efektywne gromadzenie i przetwarzanie danych dotyczących zagrożeń hałasem poprzez określanie skutków słuchowych hałasu w trakcie trwania ekspozycji.

Teza 2

Zaproponowane w rozprawie wskaźniki oceny zagrożeń hałasem prawidłowo odzwierciedlają wpływ hałasu na ryzyko wystąpienia uszkodzeń słuchu powodowanych długotrwałą ekspozycją.

Sformułowane tezy dotyczą możliwości praktycznej implementacji nowatorskich koncepcji monitorowania zagrożeń hałasem na dowolnie wybranym obszarze (np. na terenie aglomeracji miejskiej, w zakładach pracy, klubach studenckich, podczas koncertów i innych imprez plenerowych) oraz stworzenia i praktycznego sprawdzenia nowej metody oceny słuchowych zagrożeń hałasem. W tym celu zaproponowano nowe wskaźniki oceny szkodliwości hałasu oraz przeprowadzono ich eksperymentalną weryfikację.

Do przeprowadzenia wiarygodnego dowodu zaproponowanych tez zebrano obszerny zasób informacji na temat współczesnych metod oceny hałasu. Informacje te przedstawiono w rozdziale 2. Obejmuje on zarówno podstawowe pojęcia i wskaźniki hałasu, jak i zagadnienia dotyczące uregulowań prawnych obowiązujących w walce z hałasem. Zamieszczono również opis obecnie stosowanej w kraju metody oceny ryzyka uszkodzenia słuchu i analizy dozymetrycznej.

W rozdziale 3 omówiono zagadnienia związane z oddziaływaniem hałasu na organizm człowieka. Główny nacisk położono na przedstawienie skutków ekspozycji na

hałas wywieranych na narząd słuchu. W rozdziale 4 przedstawiono przegląd wybranych metod pomiaru ubytków słuchu. Skoncentrowano się przy tym na metodach stosowanych przez autora niniejszej rozprawy w przeprowadzonych badaniach słuchu.

W rozdziale 5 podano założenia projektowe i omówiono praktyczną realizację teleinformatycznego systemu monitorowania zagrożeń hałasem, realizowanego w Katedrze Systemów Multimedialnych Politechniki Gdańskiej. Przedstawiono ponadto platformę sprzętową wykorzystywaną do implementacji zaproponowanej metody oceny szkodliwości hałasu. Rozdział ten zawiera również dodatkowe informacje na temat sposobu tworzenia dynamicznych map hałasu w oparciu o opracowaną, m.in. przez autora niniejszej rozprawy, autonomiczną stację monitorowania hałasu. Stworzony system monitorowania hałasu stanowi jednocześnie podstawę dowodu pierwszej tezy niniejszej rozprawy.

Kolejny rozdział obejmuje wyniki praktycznych badań wpływu hałasu na słuch. Badania te były prowadzone w różnych warunkach akustycznych z zastosowaniem opisanych w rozdziale czwartym metod badania słuchu.

Rozdział 7 zawiera opis zaproponowanej metody oceny szkodliwości hałasu. Przedstawiono w nim schemat blokowy i zasadę działania Psychoakustycznego Dozymetru Hałasowego. Omówiono w nim również propozycję i praktyczną weryfikację nowych wskaźników oceny hałasu. Przedstawione wyniki stanowią dowód tezy drugiej.

Rozprawę kończą wnioski sformułowane w rozdziale 8, Bibliografia oraz załączniki i dodatki, zawierające szczegółowe wyniki pomiarów, badań i obliczeń.

2. WSPÓŁCZESNE METODY OCENY HAŁASU

W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd współczesnych metody oceny hałasu. Zagadnienie to jest bardzo obszerne i szeroko udokumentowane w literaturze [3][160][164][201][209]. Ponadto istnieje bardzo wiele uregulowań prawnych i norm dotyczących możliwości i konieczności stosowania poszczególnych metod pomiarowych [33][160]. Zwraca się również uwagę na ograniczenia wynikające ze stosowania tych uregulowań i metod [7][129]. Wybrano zatem jedynie podstawowe zagadnienia niezbędne dla zrozumienia przedstawionego w rozprawie wywodu.

Istnieje bardzo wiele różnorodnych metod oceny hałasu [165]. Wybór konkretnej metody uzależniony jest od rodzaju hałasu, miejsca oddziaływania czy też konsekwencji zdrowotnych, które wywołuje [31][32][47][96][155]. Autor niniejszej rozprawy skoncentrował się na zagadnieniach związanych ze skutkami słuchowymi wywołanymi ekspozycją na hałas. Zasadniczo można stwierdzić, że występują dwa główne rodzaje oddziaływania hałasu:

1. słuchowe – oddziaływanie hałasu prowadzi do zmian w działaniu narządu słuchu począwszy od czasowego, odwracalnego pogorszenia czułości słuchu aż do częściowej lub wręcz całkowitej głuchoty,
2. pozasłuchowe – rozumiane jako oddziaływanie hałasu, które wprost nie stanowi zagrożenia dla struktur układu słuchowego, lecz przez swój różnorodny charakter jest źródłem szeroko rozumianej uciążliwości. Oddziaływanie tego rodzaju hałasu jest szczególnie niebezpieczne, głównie za sprawą bardzo szerokiego spektrum pośredniego oddziaływania na zdrowie i samopoczucie człowieka.

Przedstawione w rozprawie opracowanie w swej zasadniczej części dotyczy oddziaływania hałasu wywołującego skutki słuchowe.

2.1. Podstawowe pojęcia i wskaźniki oceny hałasu

Wśród podstawowych pojęć związanych z hałasem należy w pierwszej kolejności przytoczyć kilka najważniejszych definicji.

Hałas

Stosowaną do dziś w Polsce definicję hałasu, wprowadzono w początkach lat 70. [51]: „hałasem nazywa się wszystkie niepożądane, nieprzyjemne, dokuczliwe lub

szkodliwe drgania mechaniczne ośrodka sprężystego, działające za pośrednictwem powietrza na organ słuchu i inne elementy organizmu ludzkiego”, opracowaną przez zespół: Engel, Malecki, Sadowski.

W powyższej definicji hałasu szczególne znaczenie dla rozpatrywanych w niniejszej rozprawie rodzajów aktywności, którym towarzyszy wysoki poziom dźwięku, ma słowo „szkodliwe”. Wynika to z faktu, iż zarówno użytkownicy osobistych odtwarzaczy mp3, jak i osoby przebywające w klubach muzycznych lub uczestniczące w głośnych koncertach akceptują towarzyszące tym aktywnościom warunki akustyczne. Z ich punktu widzenia wysoki poziom dźwięku jest wręcz cechą pożądaną. W takim przypadku głośne dźwięki nie będą interpretowane jako hałas i są nie tylko tolerowane, ale wręcz pożądane. Jednak w świetle przytoczonej wyżej definicji, sformułowanej przez polskie autorytety w zakresie akustyki, nawet subiektywnie pożądane dźwięki można rozpatrywać w kategorii hałasu właśnie w kontekście szkodliwego oddziaływania na narząd słuchu.

Środowisko

„...Środowiskiem jest ogół elementów przyrodniczych, w szczególności powierzchnia ziemi łącznie z glebą, kopaliny, wody, powietrze, świat roślinny i zwierzęcy, a także krajobraz, znajdujących się zarówno w stanie naturalnym, jak też przekształconym w wyniku działalności człowieka. ...” [196]. Współcześnie, dla pełniejszego i całościowego ujęcia problematyki oddziaływania hałasu na człowieka mówi się o środowisku akustycznym jako przestrzeni dźwiękowej (ang. *soundscape*), stanowiącej wspólną płaszczyznę pomiędzy człowiekiem a hałasem wytwarzanym jego aktywnością [115]. Aspekty te są obecnie szeroko dyskutowane na forum międzynarodowym podczas różnych konferencji (np. INTERNOISE, EURONOISE).

Klimat akustyczny

Sumaryczny poziom dźwięku (hałasu) emitowanego przez wszystkie źródła występujące na analizowanym obszarze określa tzw. **klimat akustyczny**. Jest to zespół zjawisk akustycznych występujących na danym obszarze, niezależnie od źródeł je wywołujących [111][177]. Najczęściej klimat akustyczny ocenia się ilościowo przy pomocy poziomu dźwięku (hałasu). Klimat akustyczny może być traktowany jako „wartościujące jakościowe” określenie hałasu w środowisku. Parametr klimat akustyczny identyfikować można z poziomem hałasu otoczenia, jako sumę

(logarytmiczną) wszystkich poziomów hałasu jednostkowego. Przy czym z uwagi na różną percepcję różnego rodzaju hałasu środowiskowego przez człowieka należy brać pod uwagę skorygowane wartości parametrów opisujących sygnały składowe (hałas drogowy, kolejowy, przemysłowy itp.) w sposób następujący [111]:

$$L_{A,KA} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \cdot (w_d E_d + w_l E_l + w_p E_p + \dots) \right] \quad (2.1)$$

gdzie:

$L_{A,KA}$ - poziom klimatu akustycznego (parametr klimatu akustycznego) [dB],

T - czas, dla którego wyznaczany jest poziom klimatu akustycznego [s],

E_i - ekspozycja na dany rodzaj hałasu środowiskowego (udział składowej hałasu środowiskowego),

w_i - waga związana z oceną danego rodzaju hałasu, przy czym indeksy „i” oznaczają:

d - hałas drogowy, l - hałas lotniczy, p - hałas przemysłowy.

Przy przyjęciu wartości wag równych 1, powyższy wzór przekształca się w klasyczną zależność do obliczania poziomu równoważnego.

Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczany jest jako:

$$L_p = 10 \cdot \log \left[\frac{p^2}{p_0^2} \right] \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

przy czym:

p - wartość skuteczna ciśnienia akustycznego [Pa],

p_0 - ciśnienie akustyczne odniesienia (20 μ Pa).

Poziom ciśnienia akustycznego skorygowanego według krzywej korekcji A, wyznaczany jest ze wzoru (wg PN-ISO 1996-1) [154]:

$$L_{pA} = 10 \cdot \log \left[\frac{p_A^2}{p_0^2} \right] \text{ [dB]} \quad (2.3)$$

gdzie:

p_A^2 - ciśnienie akustyczne A [Pa], definiowane jako wartość skuteczna ciśnienia akustycznego, skorygowanego według charakterystyki częstotliwościowej A, oznaczany typowo jako L_A

Równoważny poziom dźwięku A jest to skorygowany według krzywej korekcyjnej A poziom ciśnienia akustycznego ciągłego ustalonego dźwięku, który w określonym przedziale czasu T ma taki sam średni kwadrat ciśnienia akustycznego, jak analizowany dźwięk o poziomie zmiennym w czasie. Poziom równoważny jest wyrażony wzorem (wg PN-ISO 1996-1) [154]:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \text{ [dB]} \quad (2.4)$$

gdzie:

$L_{Aeq,T}$ - równoważny poziom dźwięku A [dB], wyznaczony dla przedziału czasu T , od t_1 do t_2 ,

p_0 - ciśnienie akustyczne odniesienia (20 μ Pa),

p_A - chwilowa wartość ciśnienia akustycznego A, mierzonego sygnału akustycznego.

Równoważny poziom dźwięku A dla przedziału czasu T jest także zwany średnim poziomem dźwięku dla przedziału czasu, $L_{A,T}$ w decybelach z czasem uśredniania zwykle zaznaczonym w indeksie (np. $L_{A,1h}$ oznacza jednogodzinny średni poziom dźwięku) [154].

Rozszerzenie definicji poziomu równoważnego:

1. Poziom równoważny jest podstawowym wskaźnikiem (parametrem) liczbowego opisu klimatu akustycznego.
2. Uwzględniając zależność poziomu dźwięku od kwadratu ciśnienia akustycznego, wzór (2.4) można zapisać:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T 10^{0,1 \cdot L_A(t)} dt \right] \text{ [dB]} \quad (2.5)$$

gdzie: $L_A(t)$ - poziom dźwięku A [dB].

3. W przypadku, gdy występuje szereg pojedynczych zjawisk akustycznych (np. przejazdu pociągów) poziom równoważny wyznacza się za pomocą zmierzonych lub wyznaczonych w inny sposób (np. metodami prognostycznymi) ekspozycyjnych poziomów dźwięku.
4. Należy zauważyć, że poziom równoważny w danym punkcie może być wyznaczony jako „suma” (w sensie dodawania wielkości logarytmicznych) poziomów odnoszących się do różnych zjawisk (źródeł). W takim przypadku uzyskuje się

wielkość, którą można nazwać poziomem hałasu otoczenia (lub tradycyjnie - wartością parametru klimatu akustycznego). Określa się ją następująco:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{Aeqi}} \right] \text{ [dB]} \quad (2.6)$$

gdzie:

L_{Aeqi} – poziom równoważny określony dla danego hałasu [dB],

$i = 1, \dots, n$ - liczba źródeł lub grup hałasów, wyznaczająca liczbę poziomów hałasu jednostkowego.

Powyższe „sumowanie logarytmiczne” jest dozwolone tylko wtedy, gdy wszystkie składniki sumy tj. poziomy L_{Aeqi} określone są dla takiego samego czasu T [154].

5. Poziom równoważny jest ściśle związany z czasem. Dwa poziomy równoważne określone dla dwóch różnych okresów czasu uważane muszą być za dwa różne wskaźniki.

6. Wzór (2.6) znajduje szerokie zastosowanie w technikach prognozowania poziomów hałasu.

Ekspozycyjny poziom dźwięku (ang. *Sound Exposure Level*, SEL) jest to poziom ekspozycji na hałas, pochodzący od pojedynczego zdarzenia akustycznego, określony wzorem (wg PN-ISO 1996-1) [154]:

$$L_{AE} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_0} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ [dB]} \quad (2.7)$$

gdzie:

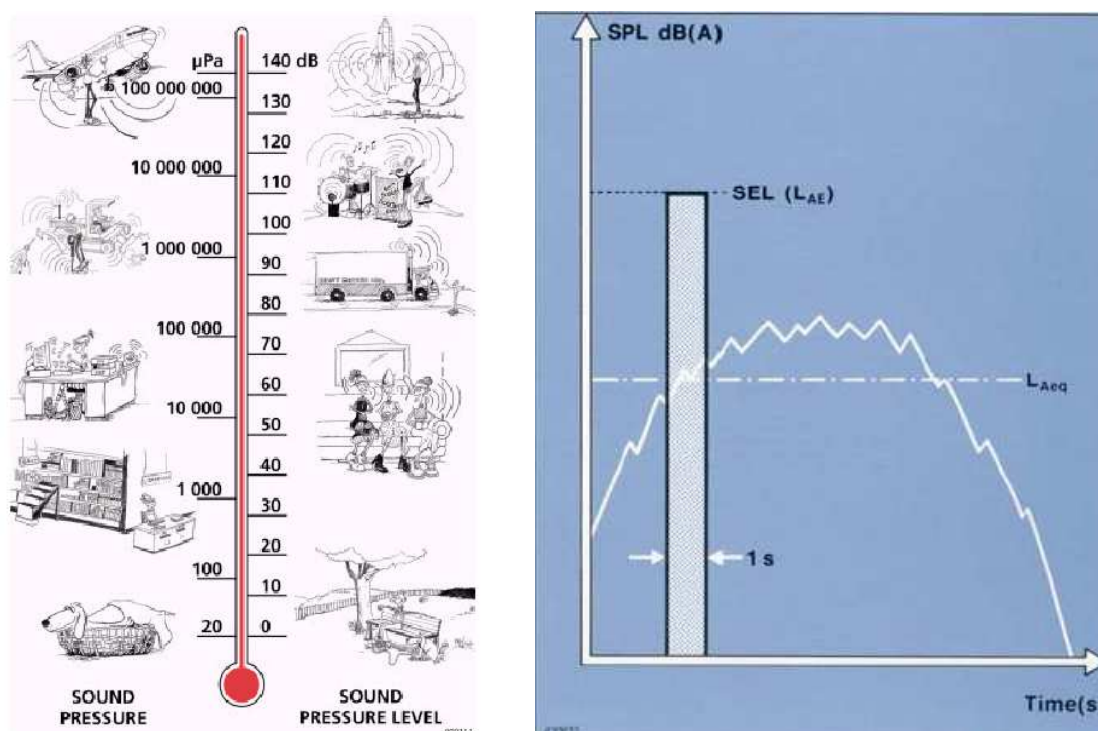
$p_A(t)$ – chwilowa wartość ciśnienia akustycznego A,

$t_2 - t_1$ – ustalony przedział czasu wystarczający, aby uwzględnić wszystkie parametry zdarzenia akustycznego,

p_0 – ciśnienie akustyczne odniesienia ($20 \mu\text{Pa}$),

t_0 – czas odniesienia (1 s).

Na rysunku 2.1 przedstawiono graficzną interpretację omówionych wyżej wskaźników oceny hałasu. Przedstawiono również poziomy ciśnienia akustycznego wyrażonego w wartościach bezwzględnych [μPa] oraz względnych [dB], odpowiadające typowym sytuacjom spotykanym w życiu codziennym.



Rys. 2.1. Graficzna interpretacja głównych wskaźników hałasu oraz poziomy dźwięku dla typowych sytuacji występujących w codziennym życiu (SEL, jak we wzorze 2.7) [53][124]

Długotrwały, średni poziom dźwięku, zgodnie z definicją PN-ISO 1996, jest to wartość średnia dla długotrwałego przedziału czasu równoważnych poziomów dźwięku A, określonych dla serii czasów odniesienia, zawartych w długotrwałym przedziale czasu. Metoda uśredniania jest opisana w normie PN-ISO 1996-2 [154].

Długotrwały, średni poziom dźwięku $L_{Aeq,LT}$ w decybelach, dla danego czasu odniesienia wyznacza się ze wzoru:

$$L_{Aeq,LT} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot (L_{Aeq,T})_i} \right] \text{ [dB]} \quad (2.8)$$

w którym:

N - liczba próbek czasu odniesienia,

$(L_{Aeq,T})_i$ - równoważny poziom dźwięku A dla i -tej próbki [dB]

Wielkość powyższa jest wyznaczana zazwyczaj przez pomiary i/lub obliczenia. Wyniki badań muszą być reprezentatywne dla zmienności wartości poziomu dźwięku w danym rejonie. Zastosowana technika pomiarowa, np. zestaw pomiarowy, liczba punktów pomiarowych, liczba i długość przedziałów czasu, zależy od rodzaju źródła dźwięku i odbiorców, a także od znaczenia wyników dla funkcji terenu.

Długotrwały średni poziom dźwięku wprowadzono do norm międzynarodowych (i wielu już norm narodowych) do oceny akustycznej zjawisk, które zmieniają się cyklicznie w okresach dłuższych niż 24 godziny. Przykładem może być ekspozycja na hałas drogowy (uliczny), gdzie występują różne warunki emisji hałasu w poszczególnych dniach tygodnia. W szczególności też zmiany dotyczące emisji hałasu mogą mieć też charakter sezonowy (np. związany ze wzmożonym ruchem turystycznym).

Nowy europejski wskaźnik oceny hałasu – **poziom dziennie-wieczorowo-nocny** wprowadzono w Dyrektywie nr 2002/49/EC w sprawie oceny i zarządzania hałasem w środowisku [46]. W Polsce ustawa Prawo ochrony środowiska wprowadziła już wiele uregulowań zgodnych z tą Dyrektywą [34][197]. W dalszej, choć nieodległej perspektywie, wprowadzone zostaną do polskiego prawa następne uregulowania, dotyczące m.in. wskaźnika proponowanego do zastosowania we Wspólnocie Europejskiej. Obecnie prowadzone są studia i badania nad relacjami między stosowanymi obecnie wskaźnikami a nowym wskaźnikiem: poziomem dziennie – wieczornym – nocnym (lub dziennie – nocnym).

Z tych powodów wprowadzono definicje omawianego wskaźnika, choć nie ma on jeszcze statusu wskaźnika obligatoryjnego. Zgodnie z załącznikiem nr I do Dyrektywy poziom L_{dwn} (lub L_{DWN}) w porze dnia-wieczoru-nocy w decybelach [dB] określa następujący wzór [46]:

$$L_{DEN} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{24} \cdot \left(12 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,d}} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_{Aeq,e} + 5)} + 8 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_{Aeq,n} + 10)} \right) \right] \quad (2.9)$$

gdzie:

$L_{Aeq,d}$ – długotrwały, średni poziom dźwięku A, zdefiniowany w normie ISO 1996-2: 1987, określony w ciągu wszystkich okresów dnia w roku,

$L_{Aeq,w}$ - długotrwały, średni poziom dźwięku A, zdefiniowany w normie ISO 1996-2: 1987, określony w ciągu wszystkich okresów wieczoru w roku,

$L_{Aeq,n}$ - długotrwały, średni poziom dźwięku A, zdefiniowany w normie ISO 1996-2: 1987, określony w ciągu wszystkich okresów nocy w roku,

przy czym:

- pora dnia trwa 12 godzin, pora wieczoru trwa 4 godziny, a pora nocy trwa 8 godzin; państwa członkowskie mogą założyć, że ogólnie przyjęty czas odpoczynku po południu stanowi część „wieczoru” i odpowiednio skrócić porę wieczoru (ustalenie to dotyczyłoby bez wyjątku hałasu pochodzącego ze wszystkich rodzajów źródeł),

- państwa członkowskie określają początek dnia (i odpowiednio początek wieczoru i nocy), przy czym ustalenie to dotyczyłoby bez wyjątku hałasu pochodzącego ze wszystkich rodzajów źródeł; jako przedziały domyślne można przyjąć 07.00–19.00, 19.00–23.00 i 23.00–07.00 czasu miejscowego, w Polsce przyjęto następujące przedziały: 06.00–18.00 pora dzienna, 18.00–22.00 pora wieczora, 22.00–06.00 pora nocy [175],
 - rok - oznacza rok brany pod uwagę pod względem emisji dźwięku i średni rok pod względem warunków meteorologicznych, przy czym średni rok pod względem warunków meteorologicznych można określić jako ten, który charakteryzuje średnie warunki meteorologiczne uśrednione dla przedziału co najmniej ostatnich dziesięciu lat,
- oraz gdzie rozważa się wyłącznie falę padającą, co oznacza, że zaniedbuje się falę odbitą od elewacji budynku lub innego rozważanego obiektu.

W ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (podsystem – monitoring hałasu) dokonano kilka lat temu próby opracowania, a następnie wyznaczania wartości **wskaźnika emisji** M (zwanego niekiedy wskaźnikiem „zapotrzebowania na środki ochrony przed hałasem”), który wiązałby uciążliwość hałasu (odzwierciedlaną przekroczeniem dopuszczalnego poziomu dźwięku) z liczbą osób eksponowanych czy też narażonych na ten hałas, z uwzględnieniem także zakresu przekroczeń. Idea takiego wskaźnika odnosi się więc do czynników określających efektywność rozwiązań przeciwdźwiękowych [78][161][174].

Definicja wskaźnika M dana jest wzorem 2.10:

$$M = \left[\sum_{i=1}^n m_i \cdot K_i \right] \quad (2.10)$$

gdzie: m_i - liczba osób zamieszkująca zagrożony teren,
natomiast:

$$\begin{cases} K_i = 10^{0,1 \cdot (L_{Ai} - L_{dop})} - 1 & \text{dla } L_{Ai} > L_{dop} \\ K_i = 0 & \text{dla } L_{Ai} \leq 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

przy czym:

L_{dop} – dopuszczalny poziom hałasu [dB]

L_{Ai} – aktualna wartość poziomu dźwięku [dB]

Wartość tego wskaźnika jest obecnie szczególnie przydatna do porównania stopnia zagrożenia hałasem różnego rodzaju terenów, przy wykorzystaniu dodatkowo bardziej pogładowej skali liniowej, a nie logarytmicznej, jak to ma miejsce w przypadku ocen poziomów. Wskaźnik ten ma uniwersalne zastosowanie, może być wykorzystywany w różnej skali szczegółowości. Wskaźnik M może też służyć do porównawczych, względnych ocen efektywności podejmowanych działań ochronnych.

Obecnie wskaźnik ten stosowany jest doświadczalnie do porównywania stopnia zagrożenia hałasem z uwzględnieniem zarówno jego miary fizycznej (poziom), jak też liczby ludzi zagrożonych.

2.2. Przepisy prawa w walce z hałasem

2.2.1. Polityka przeciwhałasowa UE

Problem hałasu jest powszechny dla wszystkich krajów Unii Europejskiej. Systemowe działania zmierzające w kierunku zmniejszenia emisji hałasu do środowiska rozpoczęły się w UE w latach 70. Dotyczyły one głównie hałasu emitowanego przez transport komunikacyjny. Niedostateczne środki przeznaczone na zwalczanie różnych źródeł hałasu spowodowały, że początkowe sukcesy przejawiające się głównie w zahamowaniu wzrostu emisji hałasu do środowiska zostały zniwelowane w latach 90. hałasem związanym z gwałtownym przyrostem liczby używanych samochodów.

Pogarszająca się sytuacja i narastające przekonanie, że hałas jest jednym z głównych czynników obniżających jakość życia w Europie stała się podstawą podjęcia przez Unię Europejską działań zapobiegawczych ukierunkowanych na zwiększenie efektywności walki z hałasem. Przejawem tych działań stała się Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady z 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku [46]. Podstawowym celem dyrektywy jest [46]:

„...zdefiniowanie wspólnego podejścia do unikania, zapobiegania lub zmniejszania szkodliwych skutków narażenia na działanie hałasu, w tym jego dokuczliwości, w oparciu o ustalone priorytety”.

Jest to możliwe przez:

- ustalanie stopnia narażenia na hałas w środowisku,
- zapewnianie społeczeństwu powszechnego dostępu do informacji na temat hałasu w środowisku i skutków jego niekorzystnego oddziaływania na człowieka,

- stworzenie planów działań zmierzających do zapobiegania, tam gdzie jest to niezbędne powstawania hałasu i obniżania jego poziomu.

Dyrektywa 2002/49/WE stworzyła podstawy dla rozwijania środków wspólnotowych w zakresie obniżania hałasu z głównych źródeł (hałas drogowy, kolejowy, przemysłowy). Do zwalczania hałasu w środowisku zostały zobowiązane władze lokalne każdego kraju członkowskiego.

Jak wspomniano wcześniej, w latach 70. oraz 80. opracowano i wdrożono w krajach ówczesnej EWG kilkanaście dokumentów regulujących problematykę hałasową w formie dyrektyw bądź dokumentów nowelizujących te dyrektywy. Wszystkie dotyczyły jednak wyrobów takich, jak pojazdy samochodowe, statki powietrzne oraz maszyny budowlane. Można powiedzieć, iż dyrektywy te miały charakter emisyjny, a największe zastosowanie miały w ocenie konkurencyjności wyrobów, których dotyczyły. Natomiast cała gałąź działalności związanej z ograniczaniem emisji hałasu pozostawała poza regulacjami prawnymi na szczeblu międzynarodowym (należy zauważyć, iż obniżenie emisji hałasu jest tylko jednym ze środków zmniejszenia jego emisji). W prawodawstwie Unii Europejskiej brak było jakichkolwiek uregulowań dotyczących akustyki urbanistycznej (na pograniczu planowania przestrzennego). Nie dokonano też standaryzacji opisu klimatu akustycznego środowiska (wskaźnik preferowany, jak np. poziom równoważny L_{Aeq}) i jego ochrony (dopuszczalne poziomy dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej).

Wydane w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych dokumenty Unii Europejskiej w tym materiały Parlamentu Europejskiego stwierdzają jednoznacznie, iż prowadzone uprzednio działania w zakresie ochrony środowiska przed hałasem, w odróżnieniu od działań odnoszących się do innych komponentów środowiska, nie przynoszą zadowalających rezultatów. Zwrócono przy tym uwagę na niedostateczne zaangażowanie zarówno rządów, jak i społeczeństw w efektywną walkę z hałasem środowiskowym. W związku z tym, mimo zaangażowania znacznych środków finansowych, stan klimatu akustycznego ulegał systematycznemu pogorszeniu. Stwierdzenie powyższe można uważać za swego rodzaju cezurę czasową zapoczątkowania nowej, zupełnie zmienionej polityki, tak zwanej Nowej (Przyszłościowej) Polityki Hałasowej (ang. *Future Noise Policy*), której ogólne założenia wyłożono w dokumentach [60][138]:

Efektom zmiany podejścia do problemów akustyki środowiska stało się zintensyfikowanie działań prowadzących w efekcie do opracowania i przyjęcia nowej Dyrektywy UE odnoszącej się do hałasu w środowisku; można używając języka

symbolicznego stwierdzić, iż dyrektywa ta ma charakter wyraźnie „imisyjny”. Celem tej dyrektywy jest uniknięcie, zapobieganie lub zmniejszenie szkodliwych skutków wpływających na zdrowie człowieka oraz na jakość ludzkiego życia w związku z narażeniem go na wysokie poziomy hałasu.

Cele Dyrektywy mają zostać osiągnięte etapami. Pierwszy etap zawiera następujące elementy:

- określenie zestawu wspólnych wskaźników dla oceny hałasu w środowisku przez Kraje Członkowskie wykorzystując istniejące krajowe metody,
- ocenę obecnych poziomów narażenia (dawka oraz efekty) poprzez mapowanie hałasu przy zastosowaniu krajowych metod oraz przekazanie wyników Komisji,
- opracowanie planów działań, gdzie będzie to niezbędne (*stosując terminologię polską – programów ochrony środowiska przed hałasem*),
- ustanowienie przez Komisję banku danych dotyczących obecnego narażenia na hałas (bank danych dotyczących map akustycznych).

Drugi etap będzie objęty propozycją rewizji niniejszej Dyrektywy lub całkowite uchylenie niniejszej Dyrektywy z utworzeniem nowej dyrektywy ramowej. Zrewidowana propozycja będzie uwzględniać następujące elementy:

- dalsze określenie wspólnych wskaźników hałasu dla większej liczby źródeł, skutków oraz sytuacji,
- wykorzystanie wspólnych metod dla obliczenia i zmierzenia wartości wskaźników hałasu,
- przepisy oraz wytyczne dla wykonania mapowania hałasu w Unii Europejskiej,
- przepisy oraz wytyczne tworzenia programów ochrony środowiska (*Action Plans*),
- przepisy dotyczące banku danych dotyczących narażenia na hałas.

Ogólnie można stwierdzić, że przy obecnej liczbie osób zagrożonych hałasem w środowisku (w UE szacuje się tę liczbę na 100 – 120 mln osób) działania w zakresie poprawy stanu klimatu akustycznego muszą być przedmiotem długofalowej, wieloletniej polityki hałasowej i związanymi z nią – programami naprawczymi.

2.2.2. Dostosowanie polskiego prawa do wymogów UE

W nowym ustawodawstwie, reprezentowanym przede wszystkim przez ustawę „Prawo ochrony środowiska” traktuje się hałas jako zanieczyszczenie środowiska, stąd przyjmowane są takie same ogólne zasady, obowiązki i formy postępowania w stosunku

do hałasu, jak do pozostałych dziedzin ochrony środowiska. Różnice dotyczą jedynie rozwiązań szczegółowych i wynikają ze specyfiki poszczególnych dziedzin ochrony.

W odniesieniu do hałasu instalacyjnego (w skład którego wchodzi hałas emitowany z zakładów przemysłowych) przepisy „Prawa ochrony środowiska” przewidują możliwość działania większości instalacji i zakładów tylko na podstawie pozwolenia. Ustawa ta wprowadza bowiem generalną zasadę, iż eksploatacja instalacji, powodująca wprowadzanie zanieczyszczeń do środowiska, jest dozwolona po uzyskaniu pozwolenia, jeżeli jest ono wymagane. Pozwolenie może być udzielone jako pozwolenie zintegrowane lub pozwolenie dla poszczególnego oddziaływania na środowisko.

Powyższe przepisy nie dotyczą dróg, linii kolejowych i tramwajowych, lotnisk i portów. Podstawową metodą ograniczania uciążliwości hałasu ze źródeł komunikacyjnych poza aglomeracjami jest tworzenie dla terenów poddanych ich oddziaływaniu programów ochrony środowiska przed hałasem. Mogą to być programy, których obowiązek sporządzenia wynika bezpośrednio z ustawy i spoczywa na wojewodzie, lub programy ochrony środowiska tworzone w ramach realizacji polityki Ekologicznej Państwa.

Ustawa wprowadza również, jako obowiązek, tworzenie programów ochrony środowiska przed hałasem dla aglomeracji liczących powyżej 100 tysięcy mieszkańców. Program taki musi zostać poprzedzony realizacją mapy akustycznej, której zakres jest zbieżny z wymaganiami zapisanymi we wspomnianej wyżej Dyrektywie UE. Dla miast liczących poniżej 100 tysięcy mieszkańców i pozostałych terenów, dla których sporządzanie programów ochrony środowiska przed hałasem nie jest obowiązkowe, działania w zakresie ograniczania uciążliwości hałasu określone powinny być w ramach programów utworzonych na rzecz realizacji polityki Ekologicznej Państwa.

Omawiana ustawa przywiązuje dużą rolę do kontroli i monitorowania stanu środowiska. Zasady ogólne zawierają wykaz obowiązków i uprawnień organów administracji i podmiotów korzystających ze środowiska w tym zakresie oraz upoważnienia dla Ministra Środowiska do opracowania referencyjnych metodyk pomiarowych, form sprawozdawczości, terminów i innych elementów systemu badań, w tym badań akustycznych.

Ustawa zawiera wiele upoważnień, głównie dla ministra właściwego do spraw środowiska, do wydania rozporządzeń wykonawczych. Jednym z najistotniejszych jest

upoważnienie do wydania rozporządzenia w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku [34][173].

2.2.3. Ocena ryzyka uszkodzenia słuchu

Współcześnie, w ocenie ryzyka uszkodzenia słuchu, uwzględnia się poziom ekspozycyjny hałasu odniesiony do ośmiogodzinnego dnia pracy, wartość L_{Amax} oraz L_{Cpk} . Poziom ekspozycyjny można wyznaczyć, znając wartość poziomu równoważnego dźwięku. Poniżej przedstawiono wzory opisujące wyżej wymienione parametry [155]:

Poziom dźwięku A, L_A , w dB - poziom ciśnienia akustycznego skorygowany według charakterystyki częstotliwościowej A.

Poziom dźwięku C, L_C , w dB - poziom ciśnienia akustycznego skorygowany według charakterystyki częstotliwościowej C.

Maksymalny poziom dźwięku A, L_{Amax} , w dB - maksymalna wartość skuteczna poziomu dźwięku A, występująca w czasie obserwacji.

Szczytowy poziom dźwięku C, L_{Cpk} , w dB - maksymalna wartość chwilowa poziomu dźwięku C, występująca w czasie obserwacji.

Równoważny poziom dźwięku A, $L_{Aeq,Te}$, w dB.

$$L_{Aeq,Te} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T_e} \cdot \int_0^{T_e} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right) \quad (2.12)$$

T_e – czas ekspozycji

p_A – ciśnienie akustyczne skorygowane według charakterystyki korekcyjnej A

p_0 – ciśnienie akustyczne odniesienia = 20 μ Pa

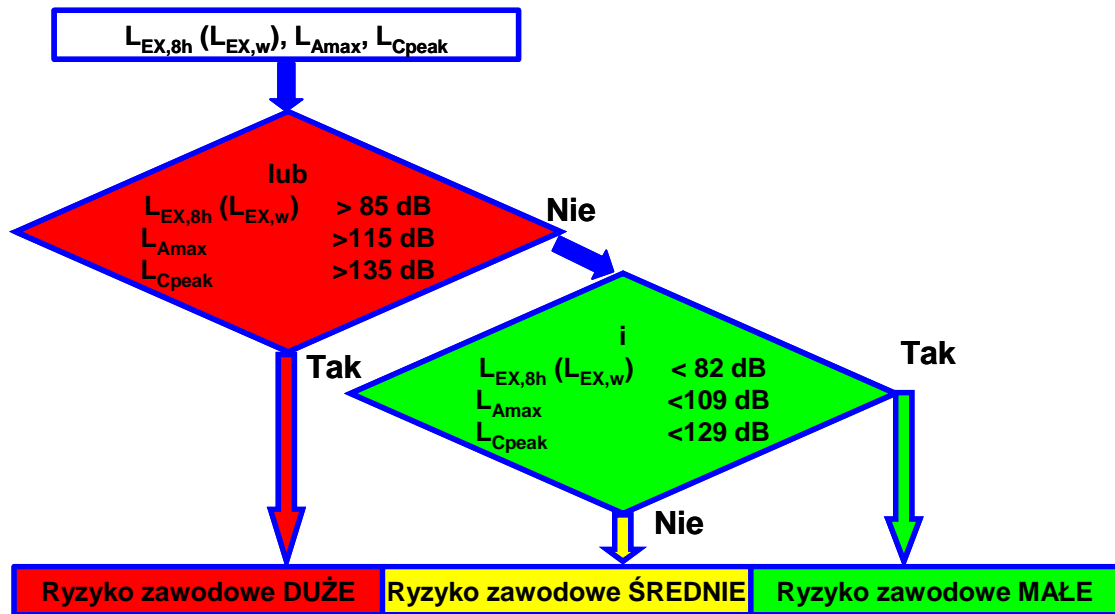
Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy, $L_{EX,8h}$, w dB.

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,Te} + 10 \cdot \log_{10} \frac{T_e}{T_0} \quad (2.13)$$

T_e – czas ekspozycji

T_0 – czas odniesienia = 8h = 28800 s

Na rysunku 2.2 przedstawiono diagram obrazujący sposób oceny ryzyka uszkodzenia słuchu w środowisku pracy w zależności od wartości, jakie przyjmują poszczególne parametry [209].



Rys. 2.2. Określanie ryzyka zawodowego wynikającego z narażenia na hałas słyszalny ($L_{EX,8h}$ – poziom ekspozycji na hałas, L_{Amax} – maksymalny poziom dźwięku A, L_{Cpeak} – szczytowy poziom dźwięku C) [209]

Zaprezentowana metoda oceny ryzyka uszkodzenia słuchu opiera się na wyrażonych w normach dopuszczalnych poziomach hałasu. Za jej pomocą można ocenić czy klimat akustyczny w danym miejscu (stanowisku pracy) stwarza zagrożenie dla słuchu osób tam przebywających, a z drugiej czy wymagane jest stosowanie środków ochrony indywidualnej słuchu zabezpieczających przed szkodliwym oddziaływaniem hałasu.

2.2.4. Analiza dozymetryczna

Analiza dozymetryczna umożliwia wyznaczenie dawki hałasu dostarczonej do organizmu w zadanych warunkach akustycznych. Poniżej przedstawiono sposób obliczenia dziennej dawki hałasu przy znajomości poziomu równoważnego dźwięku [33].

Dzienna dawka hałasu wyznaczana jest w %:

$$D = \left(100 \cdot \frac{T}{T_c} \right) \cdot 2^{\frac{L_t - L_c}{10}} \quad (2.14)$$

gdzie:

T – czas ekspozycji wyrażony w sekundach,

T_c – czas odniesienia równy 8 godzin (28800 s),

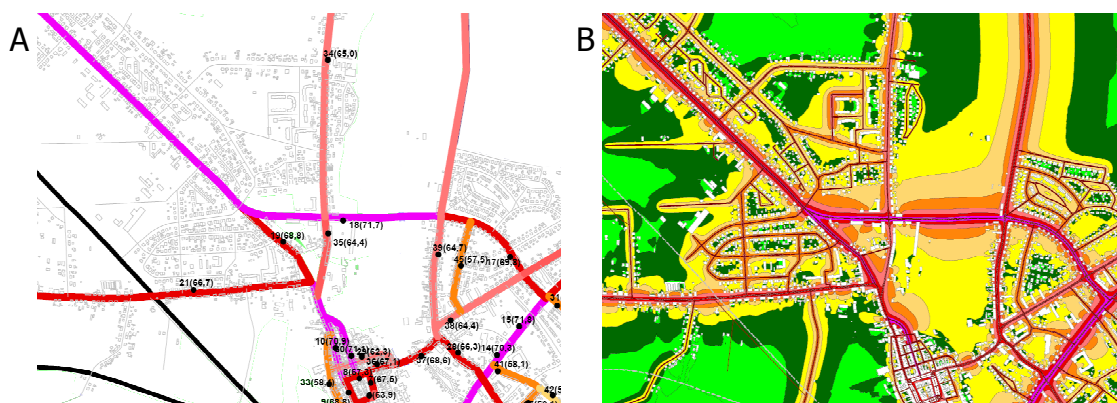
L_t – równoważny poziom dźwięku A dla czasu ekspozycji T ,

L_c – poziom dopuszczalny (85 dBA),

Q – współczynnik wymiany, równy 3 (zgodnie z hipotezą równoważności energii).

Emisyjne i imisyjne mapy akustyczne

Współczesne mapy hałasu powstają w oparciu o modelowanie numeryczne wybranych źródeł hałasu obecnych w środowisku (hałas drogowy, kolejowy, przemysłowy, lotniczy) z uwzględnieniem warunków propagacyjnych występujących na analizowanym obszarze. Na rysunku 2.3 przedstawiono dwa rodzaje map hałasu drogowego. Rysunek A przedstawia poziomy emisyjne wytwarzane przez poszczególne drogi, rysunek B przedstawia obliczony rozkład oddziaływania hałasu wytwarzanego przez dane źródła.



Rys. 2.3. Różne rodzaje map hałasu. Rysunek A – mapa emisyjna, rysunek B – mapa imisyjna [80]

Mapy strategiczne

Mapy strategiczne – są sporządzane dla oceny istniejącego, poprzedniego i przyszłego klimatu akustycznego w oparciu o wskaźniki hałasowe, wskazania przekroczeń wartości granicznych, wskazania liczby mieszkańców, szkół, szpitali zlokalizowanych na określonych terenach charakteryzowanych konkretnymi wartościami wskaźników oceny hałasu, wykazania liczby ludzi znajdujących się na eksponowanych powierzchniach terenu [117].

Mapy te stanowią podstawę do opracowywania programów naprawczych [46][197]. Jednak dodatkowym uzupełnieniem informacji o zagrożeniu hałasem na danym terenie mogą być wyniki badań subiektywnej wrażliwości i uciążliwości na hałas [126]. Osoby o większej wrażliwości na hałas częściej skarżą się na hałas komunikacyjny [73]. Wrażliwość na hałas nie zależy bezpośrednio od poziomu hałasu, lecz jest osobniczo zróżnicowaną skłonnością do odczuwania uciążliwości

powodowanej hałasem. Uwzględnienie subiektywnych odczuć i preferencji mieszkańców może zwiększyć skuteczność podejmowanych inicjatyw zmierzających do poprawy klimatu akustycznego [73].

Mapy dynamiczne

Typowy proces tworzenia mapy akustycznej hałasu, w wielkim uproszczeniu, polega na gromadzeniu informacji o źródłach hałasu (ruch drogowy, kolejowy, lotniczy, aktywność zakładów przemysłowych). Ponadto wykonuje się rzeczywiste pomiary w stosunkowo niewielkim zagęszczeniu przestrzennym i następnie modeluje się propagację hałasu w środowisku z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu. W ten sposób powstają mapy statyczne, które obrazują dane w sposób oderwany od stanu istniejącego w momencie przeglądania mapy, ale umożliwiają szacowanie poziomu hałasu w porach doby (przeważnie jest wykonywana osobna mapa dzienna i nocna). Niekiedy mapa jest wykonywana także w kilku porach roku, w których prowadzono pomiary dające podstawę opracowaniu map akustycznych.

Do celów modelowania propagacji hałasu istnieje specjalistyczne oprogramowanie, w większości opracowane przez zagraniczne firmy, które było wykorzystywane przy tworzeniu map akustycznych licznych miast europejskich [20][83][116][130][156][187]. Oprogramowanie to jest na ogół bardzo kosztowne, a podejście tego typu uniemożliwia prowadzenie ciągłego monitoringu i bywa niedokładne w sytuacji, gdy wyjściowy model obszaru jest płaski, tzn. nie uwzględnia wysokości przeszkód akustycznych, czyli wzniesień, przegród, budynków oraz w sytuacji, kiedy pojawiają się nieuwzględnione uprzednio elementy zabudowy i nowe źródła hałasu. Na ogół jednak akustycy zajmujący się tym tematem są zwolennikami tego typu metodyki, ponieważ jest ona zgodna z upowszechniającymi się wymaganiami prawnymi i normatywnymi [46][154].

Zastosowanie narzędzi teleinformatycznych do ciągłego pozyskiwania danych nie musi być jednak sprzeczne z opisanym wyżej podejściem, ma ono jednak wyraźną przewagę. Dane pozyskiwane na bieżąco mogą stać się podstawą dynamicznej mapy, również uwzględniającej numeryczny model terenu i występujące w nim przeszkody akustyczne oraz zjawiska propagacyjne. W tym przypadku numeryczny model terenu i znajdujących się w nim obiektów może być uaktualniany jak dotychczas, czyli w dłuższych odstępach czasu, zaś ciągła kontrola emisji hałasu w wybranych punktach

może w oczywisty sposób pozytywnie wpłynąć na wiarygodność obserwowanej mapy hałasu.

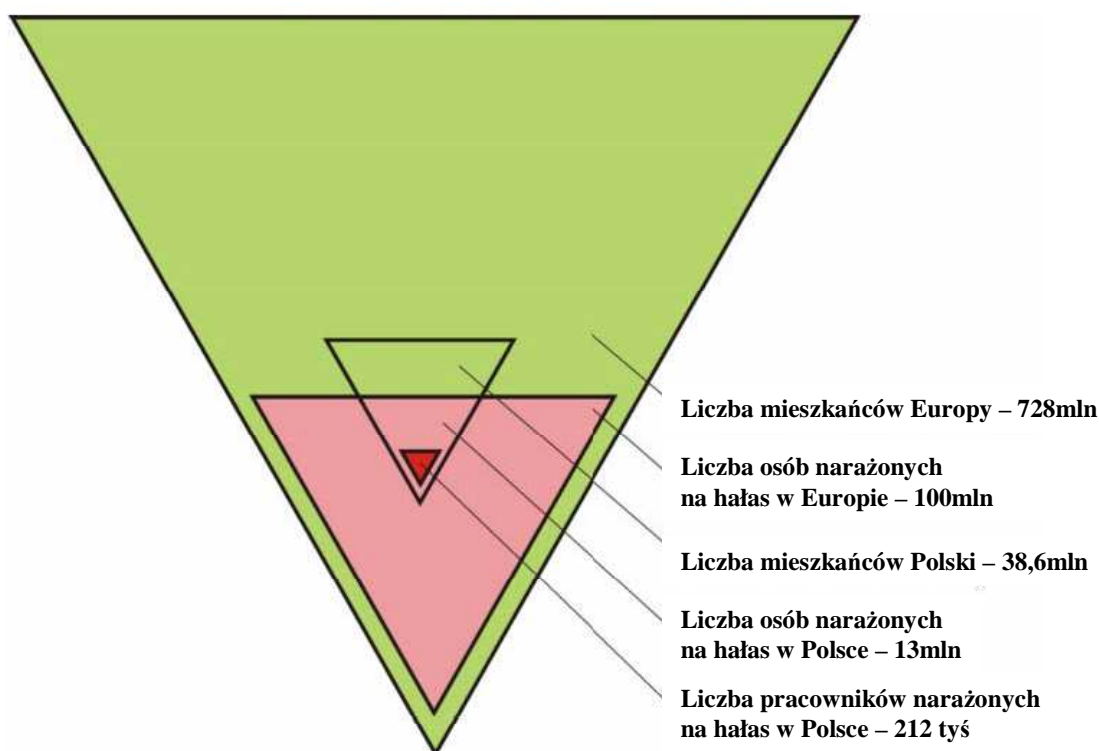
Zadaniem modelu propagacji dźwięku jest obliczanie poziomu hałasu w podanych punktach w terenie na podstawie odpowiednich danych. Zalicza się do nich: źródła hałasu, rzeźba terenu, rodzaj podłoża, przeszkody (budynki, ekrany akustyczne), punkty, w których należy obliczyć wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Program „model propagacji dźwięku” pobiera wyżej wymienione informacje niezbędne do obliczenia poziomu dźwięku z bazy danych, przetwarza je i zwraca zarys konturów krzywych o jednakowej wartości poziomu hałasu. W dalszym procesie przetwarzania obliczone wartości zostają nałożone na istniejącą mapę terenu jako kolejna warstwa informacyjna. W ten sposób powstaje mapa hałasu. Następnie mapa umieszczana jest w witrynie internetowej.

Opracowywany w Katedrze Systemów Multimedialnych (KSM) Politechniki Gdańskiej moduł automatycznego tworzenia dynamicznych map hałasu działa zarówno w oparciu o komercyjne oprogramowanie, jak i opracowane procedury. Jest częścią Multimedialnego Systemu Monitorowania Hałasu przedstawionego w rozdziale 5. W pracach nad opracowaniem tego systemu brał udział również autor niniejszej rozprawy jako koordynator zespołu wykonawców oraz wykonawca wybranych jego części.

3. STAN ZAGROŻENIA I SKUTKI ODDZIAŁYWANIA HAŁASU

W niniejszym rozdziale przedstawiono ogólny opis stanu zagrożenia hałasem w środowisku życia i pracy. Dokonano syntezy wiedzy na temat oddziaływania hałasu na zdrowie człowieka, ze szczególnym uwzględnieniem skutków słuchowych, w tym różnorodnych ubytków słuchu wywołanych nadmiernym hałasem.

Jak wspomniano w rozdziale 2, hałasem jest każdy niepożądany, nieprzyjemny, dokuczliwy oraz szkodliwy dźwięk. Można więc powiedzieć, że hałas towarzyszy praktycznie każdej działalności człowieka. Człowiek narażony jest także na hałasy wewnątrz mieszkaniowe oraz hałasy sąsiedzkie. Powszechność występowania hałasu powoduje wiele negatywnych skutków, szczególnie dla jakości życia i zdrowia człowieka. Szacuje się, że w Europie narażenie na hałas dotyczy około **100 milionów** osób (rys. 3.1) [51][209].



Rys. 3.1. Stopień narażenia na hałas w Europie i w Polsce [51][209]

Powszechność występowania hałasu powoduje, że bez jego uwzględnienia nie jest możliwa wiarygodna ocena parametrów środowiska życia i pracy człowieka. Należy zauważyć, że wraz ze wzrostem stopnia nasycenia środowiska życia źródłami hałasu oraz wprowadzania nowych form organizacji pracy (praca na odległość – telepraca)

różnice pomiędzy środowiskiem życia (traktowanym często jako synonim środowiska wypoczynku) i środowiskiem pracy coraz bardziej się zacierają [135][209].

Współcześnie, obok różnorodnych źródeł hałasu w miejscu zamieszkania i środowisku pracy powszechna staje się dobrowolna ekspozycja na nadmierny poziom dźwięku towarzysząca rozrywce [17][104][136][145]. Należy tu wymienić nieumiejętne korzystanie z przenośnych odtwarzaczy dźwięku oraz częste i długotrwałe przebywanie w klubach, w których emituje się dźwięki o bardzo wysokich poziomach.

3.1. Oddziaływanie hałasu na człowieka

Szkodliwe oddziaływanie hałasu jest procesem złożonym [4][82][194]. Hałas, kumulując się w czasie, może doprowadzić do częściowej lub całkowitej utraty słuchu, a nawet powoduje poważne zmiany psychosomatyczne, spośród których najczęściej wymienia się zagrożenie nadciśnieniem, zaburzenia nerwowe, komplikacje z prawidłowością przemiany materii oraz zaburzenia w układzie naczyniowym [204]. Jego działanie wywołuje zmęczenie, złe samopoczucie, utrudnia sen i wypoczynek i z tego powodu, coraz częściej hałas jest jednym z głównych powodów skarg kierowanych do organów ochrony środowiska [34].

Hałas oddziałuje ujemnie na organ słuchu i ośrodkowy układ nerwowy, powodując pojawienie się ostrego lub przewlekłego urazu akustycznego, któremu towarzyszy wiele reakcji obronnych, jak np. zmiany akcji serca, rytmu oddychania, ciśnienia tętniczego krwi [24], temperatury ciała itp. W środowisku lekarskim negatywne następstwa zdrowotne wywołane ekspozycją na hałas określane są mianem tzw. zespołu pohałasowego. Obejmuje on: bóle i zawroty głowy, osłabienie, zwiększoną pobudliwość nerwową, zaburzenie snu, zwiększoną potliwość, uszkodzenie słuchu. Hałas wpływa również na zmniejszenie zrozumiałości mowy, zaburza wzrok i rozprasza uwagę. Udowodniono, że hałas jest przyczyną przedwczesnego starzenia i w 30 przypadkach na 100 skraca życie mieszkańców dużych miast o 8-10 lat. Z punktu widzenia szkodliwości dla zdrowia hałasy można podzielić na [210]:

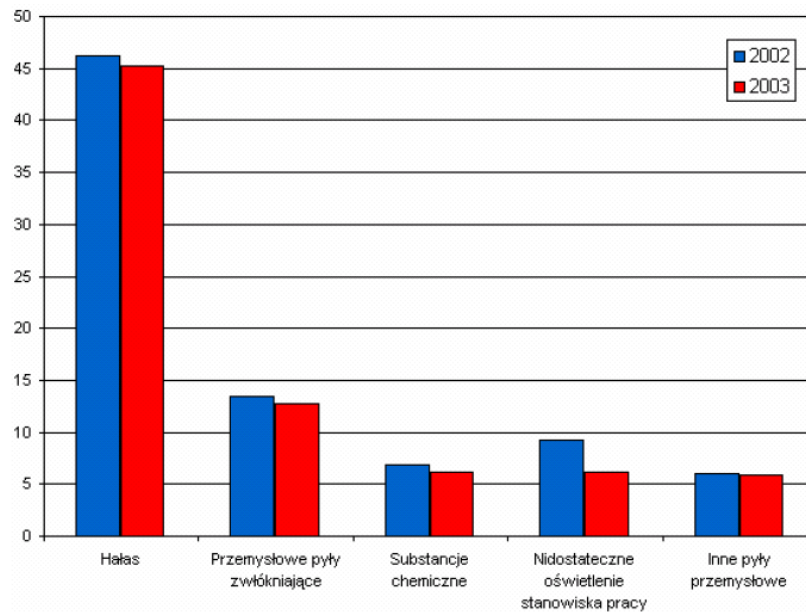
- Hałasy o **poziomie poniżej 35 dB** nie są szkodliwe dla zdrowia, ale mogą być denerwujące. Hałasy te mogą przeszkadzać w pracy wymagającej skupienia np. projektowaniu, pisaniu itp.
- Hałasy o **poziomie od 35 do 70 dB** wywierają ujemny wpływ na układ nerwowy człowieka. Pociąga to za sobą zmęczenie i spadek wydajności pracy. Może on obniżyć zrozumiałość mowy i utrudnić zasypianie i wypoczynek.

- Hałas o **poziomie od 70 do 85 dB** trwające stale, mogą powodować zmniejszenie wydajności pracy, trwałe osłabienie słuchu, bóle głowy i ujemny wpływ na ustrój nerwowy człowieka.
- Hałas o **poziomie od 85 do 130 dB** powodują liczne uszkodzenia słuchu i różne schorzenia, jak zaburzenia układu krążenia, nerwowego, równowagi i inne oraz uniemożliwiają zrozumienie mowy nawet z odległości 0,5 metra.
- Hałas o **poziomie od 130 do 150 dB** pobudzają do drgań niektóre wewnętrzne organy ludzkiego ciała, powodując ich uszkodzenie, a niekiedy zupełne zniszczenie. Ludzie pracujący w takim hałasie mają z reguły poważnie osłabiony, a najczęściej uszkodzony słuch.
- Hałas o **poziomie powyżej 150 dB** już po 5 minutach całkowicie paraliżują działanie organizmu, powodują mdłości, zaburzenia równowagi, uniemożliwiają wykonywanie skoordynowanych ruchów kończyn, zmieniają proporcje zawartości składników we krwi, wytwarzają u człowieka stany lękowe i depresyjne, powodują inne objawy chorób psychicznych. Wśród ludzi zatrudnionych w hałasie o tym poziomie (np. w hamowniach silników odrzutowych) aż 80 % zapada na nieuleczalne choroby [204].

Hałas jest jednym z dominujących czynników szkodliwych środowiska pracy [6][81][209]. Jego destrukcyjny wpływ na słuch pracowników jest szeroko udokumentowany w literaturze [22][84][99][148][195]. Obecność dodatkowych czynników, takich jak np. wibracje potęguje negatywne skutki oddziaływania hałasu [82]. Według danych GUS z 2003 r. na 97,1 osób na 1000 zatrudnionych w warunkach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi aż 45,2 osób było zatrudnionych w warunkach zagrożenia hałasem. Ten niekorzystny wskaźnik był w roku 2003 nieznacznie tylko mniejszy niż w roku 2002, w którym wynosił 46,2 (rys. 3.3). Zapadalność na choroby zawodowe jest analizowana zgodnie z wytycznymi wprowadzonymi przez rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. w sprawie wykazu chorób zawodowych, szczegółowych zasad postępowania w sprawach zgłaszania, podejrzenia, rozpoznawania i stwierdzania chorób zawodowych oraz podmiotów właściwych w tych sprawach (Dz.U. Nr 132, poz. 1115) oraz rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie dokumentowania chorób zawodowych i skutków tych chorób (Dz.U. Nr 132, poz. 1121). Wśród chorób

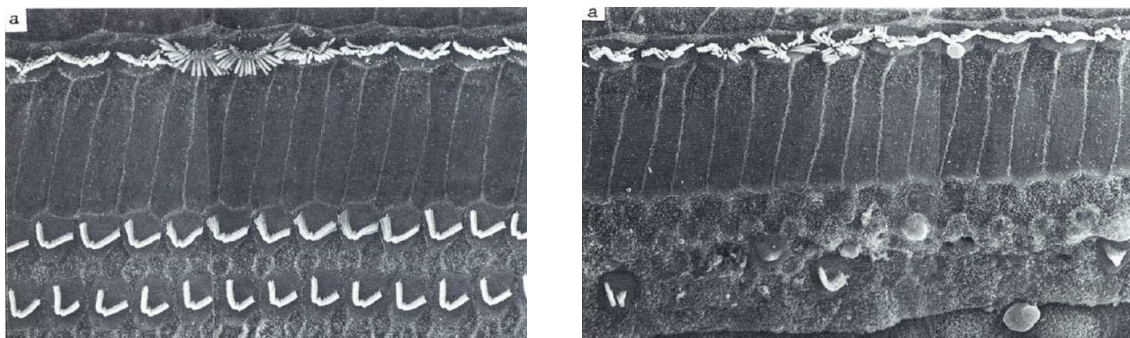
zawodowych ujęty jest **obustronny trwały ubytek słuchu typu ślimakowego spowodowany hałasem** [209].

Narażenie na hałas o poziomie dźwięku przekraczającym 90 dB powoduje w skali czasu ekspozycji nieodwracalne uszkodzenie komórek rzęskowych w organie Cortiego, który jest narządem odbiorczym ucha wewnętrznego.



Rys. 3.3. Zatrudnieni w warunkach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi na 1000 zatrudnionych [209]

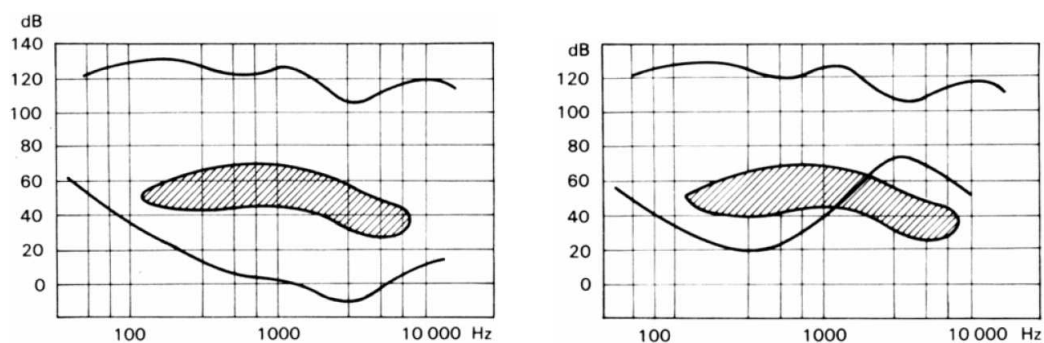
Zadaniem komórek rzęskowych jest przetworzenie drgań mechanicznych dźwięku na impulsy neuronowe kierowane do wyższych pięter słuchowych. Na rys. 3.4 przedstawiono zniszczenia, jakim ulegają komórki słuchowe zewnętrzne na skutek nadmiernego narażenia na hałas. Konsekwencją zniszczenia komórek rzęskowych w uchu wewnętrznym są trudności w odbiorze dźwięków określane jako ubytki słuchu [29][71]. W badaniach audiometrycznych objawia się to jako podwyższenie krzywej progowej słyszenia.



Rys. 3.4. Zdrowe (z lewej) i zniszczone (z prawej) komórki rzęskowe zewnętrzne [209]

Najwcześniej pojawiające się ubytki słuchu wskutek uszkodzenia hałasem dotyczą częstotliwości 4 i 6 tysięcy Hz [123]. Są to częstotliwości, przy których występuje największa czułość słuchu, i dlatego słuch jest w tym zakresie częstotliwości szczególnie podatny na uszkodzenia. Konsekwencją utraty słuchu wskutek szkodliwego działania hałasu są znaczne zaburzenia w ocenie głośności dźwięków, utrata zdolności rozróżniania wysokości dźwięku oraz ograniczenie zdolności określania kierunku dochodzenia dźwięku

Najpoważniejszą społecznie konsekwencją utraty słuchu wskutek oddziaływania hałasu jest pogorszenie lub brak zrozumiałości mowy [77]. Jest ona spowodowana tym, że przesunięcie krzywej progowej osoby z uszkodzonym słuchem ogranicza znacznie obszar rozumianej mowy, co zostało schematycznie przedstawione na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Krzywa progowa (dolna), krzywa bólu (górną) oraz obszar mowy (zakreślony) dla osoby ze słuchem prawidłowym. Krzywa progowa (dolna), krzywa bólu (górną) oraz obszar mowy (zakreślony) dla osoby ze słuchem uszkodzonym [209]

Do powszechnie znanych skutków hałasu zaliczyć można ubytki słuchu wynikające z długotrwałej ekspozycji na dźwięki o wysokim poziomie [23][27][47]. Zgodnie z danymi Centralnego Instytutu Ochrony Pracy, zawodowe uszkodzenie słuchu, trwałe, nie dające się rehabilitować inwalidztwo znajduje się od lat na czołowym miejscu na liście chorób zawodowych. Wnosi ono do krajowej statystyki chorób zawodowych ok. 2-3 tys. nowych przypadków rocznie, co stanowi ok. 1/3 wszystkich rejestrowanych przypadków [81]. Choroby zawodowe powodowane hałasem to jedynie pewna część większej całości. Ubytki słuchu obserwuje się również u osób nadużywających przenośnych odtwarzaczy dźwięku. Jak wykazały badania, przeciętny użytkownik przenośnego odtwarzacza narażony jest na dźwięki o poziomie równoważnym A równym 103 dB, natomiast przez 1% czasu ekspozycji poziom ciśnienia akustycznego przekracza 117 dB. Zmierzone poziomy ciśnienia akustycznego

towarzyszące odtwarzaniu muzyki w słuchawkach przenośnych odtwarzaczy przyjmują wartości niebezpiecznie duże u ponad 90% populacji. Z uwagi na długi czas ekspozycji, sięgający często kilku godzin dziennie przez siedem dni w tygodniu, należy oceniać, iż konsekwencją nadużywania przenośnych odtwarzaczy przez młodzież licealną w Polsce mogą stać się ubytki słuchu u znaczącej części ich użytkowników [86]. Zwracają uwagę znaczne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach 3,15; 4 i 5 kHz. Poziomy ciśnienia akustycznego w tym właśnie zakresie przekraczają dopuszczalne dzienne dawki dla zaledwie 5-minutowej ekspozycji. Należy przypuszczać, że ewentualne ubytki słuchu powstałe wskutek użytkowania przenośnych odtwarzaczy dźwiękowych mogą wystąpić najwcześniej dla częstotliwości bliskich 5 kHz [170]. Używanie przenośnych odtwarzaczy dźwięku wywołuje czasowe przesunięcie progu słyszenia. Czasowe przesunięcie progu jest prawie zawsze największe przy 6 kHz [74].

Głośna muzyka (systemy dźwiękowe przenośne, domowe i w samochodach), przebywanie w hałaśliwych miejscach (dyskoteki, koncerty pop/rock) [15][149], długotrwała ekspozycja na hałas komunikacyjny, są przyczyną selektywnych ubytków o różnej głębokości (zwanym w audiologii typem „*Notch*” czy „*v-dip*”) przypadające na ogół przy częstotliwości 6 kHz, rzadziej przy częstotliwościach 4 lub 8 kHz. Dość często ubytki słuchu wywołane hałasem (ang. *Noise Induced Hearing Loss*, NIHL) obejmują szerszy zakres częstotliwości [5][9][95][123]. Czynniki te mogą być również przyczyną powstawania szumów usznych, dolegliwości niezwykle uciążliwej ze względu na swój permanentny charakter [72][76][103][140][209].

Szkodliwe działanie hałasu polega na tym, że bezpośrednio uszkadza ucho wewnętrzne, czyli tzw. ślimak, w wyniku czego może dojść do znacznego pogorszenia słuchu, a nawet całkowitej głuchoty [16][19][29][45][59][71][209]. Konsekwencją tego są trudności w rozumieniu mowy [77]. Okazuje się, że nawet niewielkie poziomy hałasu są już szkodliwe, szczególnie dla małych dzieci [66][137]. Hałas może stać się przyczyną opóźnień w rozwoju kory słuchowej. Jest też źródłem znacznej uciążliwości [1][93][147]. Do niebezpiecznych źródeł hałasu zaliczyć trzeba także niektóre zabawki. Niejednokrotnie zdarza się, że generują one niebezpiecznie wysokie poziomy dźwięku w bezpośredniej bliskości uszu dziecka (81-126 dB mierzony w odległości 2,5 cm od powierzchni zabawki i 80-115 dB w odległości 25 cm) [207]. Warto również wspomnieć o szkodliwym oddziaływaniu hałasu niskoczęstotliwościowego. Hałas ten uznawany jest za pewnego rodzaju fenomen, polegający na tym, że nie powoduje on

ubytków słuchu, ale oddziałuje niekorzystnie na inne elementy ludzkiego ciała i może wywołać nieodwracalne zmiany organiczne [7].

3.2. Ubytki słuchu wywołane hałasem

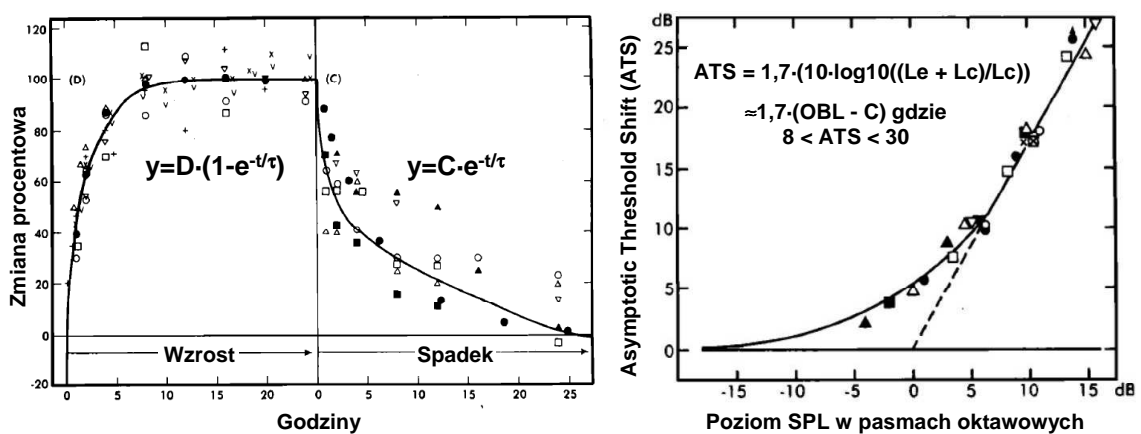
W przypadku ekspozycji na stały, długotrwały i intensywny bodziec akustyczny dochodzi do niedostatecznej podaży energii potrzebnej do uzupełnienia w komórkach rzęskowe narządu Cortiego poziomów enzymów zużywanych w procesie przetwarzania drgań mechanicznych sygnałów akustycznych na elektryczne impulsy nerwowe. Jednocześnie, pod wpływem silnego bodźca dochodzi do skurczu naczyń krwionośnych, co pociąga za sobą niedostateczną podaż tlenu i substancji odżywczych do ślimaka. W wyniku obu procesów, komórki rzęskowe ulegają rozlicznym zmianom takim, jak np. zwiotczenie, obrzmienie jąder, zwyrodnienie wodniczki cytoplazmy i szeregu innym w zależności od intensywności i trwania nadźwiękawiania [142][151]. Zmiany te można obserwować pod mikroskopem elektronowym [67][68]. Badaniami audiometrycznymi stwierdza się wówczas podniesienie progu słuchu.

Jeżeli ekspozycja nie przedłuża się lub poziom bodźca nie jest zbyt wysoki, to po pewnym czasie komórki się regenerują, powraca również czułość słuchu. Gdy czas na regenerację jest zbyt krótki, dochodzi w wyniku niedoboru składników odżywczych i tlenu do zwyrodnienia komórek rzęskowych, a w końcu do ich zaniku. Badaniami audiometrycznymi stwierdza się utrwalone podniesienie progu słuchu [30][133][139][171].

3.2.1. Czasowe zmęczenie słuchu – TTS

Przewlekły uraz akustyczny może powodować na początku przejściowe upośledzenie słuchu i przesunięcie krzywej progowej audiogramu [127][128]. To przejściowe przesunięcie krzywej progowej jest nazywane czasowym przesunięciem progu słyszenia (ang. *Temporary Threshold Shift*, TTS) [112][125]. Poniżej przedstawiono przykładowe wykresy ilustrujące proces czasowej zmiany progu słyszenia. Wykresy pokazują znormalizowaną zmianę progu słyszenia zmierzoną dla różnych częstotliwości. Wyraźnie widoczny jest wykładniczy charakter zmiany progu słyszenia. Rozpatrując zagadnienie związane z czasowym przesunięciem progu słyszenia (TTS), konieczne trzeba przywołać jeszcze jedno pojęcie. Jest nim asymptotyczne przesunięcie progu słyszenia (ang. *Asymptotic Threshold Shift*, ATS). Oznacza ono maksymalny poziom przesunięcia progu słyszenia przy zadanym poziomie

hałasu. Nazwa tego parametru odzwierciedla proces pogłębiania się czasowego przesunięcia progu słyszenia. Jak pokazano na rysunku 3.6, poziom przesunięcia progu narasta asymptotycznie do wartości maksymalnej związanej z poziomem hałasu. Wykres z prawej strony przedstawia zależność pomiędzy poziomem hałasu (odniesionym do wartości krytycznej I_c) a wartością ATS, lewa strona rysunku przedstawia znormalizowane wyniki czasowej zmiany progu słyszenia uzyskane dla różnych częstotliwości w toku badań prowadzonych przez zespół pod kierunkiem Millsa. Podano również proste formuły matematyczne, bazujące na funkcjach eksponencjalnych, zastosowane do opisu procesu narastania i zanikania efektu TTS.



Rys. 3.6. Znormalizowane wyniki zmian poziomu TTS, Widoczna faza narastania i opadania. Podano równania opisujące uzyskane wyniki w formie prostych równań wykładniczych. Wykres prawy przedstawia znormalizowane wyniki badań ATS wg Millsa [128]

Poniżej przedstawiono właściwości efektu TTS [110][210]:

1. Działanie hałasu ciągłego i stałego pod względem składu widmowego i poziomu powoduje zjawisko TTS proporcjonalne do logarytmu czasu ekspozycji, tzn., że podwojenie efektu TTS w decybelach wymaga 10-krotnego przyrostu czasu narażenia. Ustąpienie umiarkowanej wielkości TTS przebiega podobnie, jak logarytmiczna funkcja czasu powrotu do progu wyjściowego, który stabilizuje się w granicach 16 godzin po narażeniu na hałas. Innymi słowy, zarówno narastanie, jak i powrót TTS do normy ma początkowo szybki, gwałtowny przebieg, który staje się stopniowo coraz powolniejszy. Jednakże w przypadku, gdy TTS osiąga 40 dB lub więcej, powrót do poprzedniego stanu może być liniowy w czasie i całkowita normalizacja progu słuchu wymaga dni, a nawet tygodni. W tym przypadku 40 dB lub 50 dB TTS oznacza pewien rodzaj

„krytycznego TTS”, którego nie należy przekraczać, jeśli chce się uniknąć niebezpieczeństwa trwałego uszkodzenia słuchu [157].

2. TTS wzrasta liniowo wraz ze średnim poziomem hałasu, począwszy od poziomów 70-75 dB, poniżej których zwykle nie dochodzi do zmian progu bądź tylko krótkotrwałych bez względu na czas trwania ekspozycji i, aż do poziomu 130 dB. Oznacza to, że różnica pomiędzy czasowymi przesunięciami progów wytwarzanymi przez hałasy o poziomach 100 i 110 dB będzie mniej więcej taka sama, jak różnica pomiędzy czasowymi przesunięciami progów spowodowanymi hałasem 110 i 120 dB.

3. Hałas, którego maksimum energii obejmuje niskie częstotliwości, wytwarza mniejszy efekt TTS niż hałas wysokoczęstotliwościowy [201].

4. Zakres częstotliwości, w którym występuje TTS zależy od bodźca; w przypadku hałasu szerokopasmowego, maksymalne czasowe przesunięcie progu obserwuje się w zakresie 3000-6000 Hz, a przy działaniu tonów czystych i hałasu wąskopasmowego o pół lub oktawę wyżej od częstotliwości bodźca. Najbardziej skuteczny dla wywołania TTS jest bodziec o częstotliwości około 3000 Hz.

5. Ekspozycja przerywana powoduje mniejsze czasowe podwyższenie progu słyszenia niż ciągła, co oznacza, że ucho toleruje więcej całkowitej energii akustycznej w przypadku bodźca przerywanego. TTS w tym przypadku jest nie tylko funkcją poziomu, lecz także stosunku czasu trwania hałasu do czasu przerwy oraz liczby powtarzanych cykli. Korzystną okolicznością wpływającą na wielkość TTS są również przerwy w czasie trwania hałasu ciągłego

6. Zjawisko TTS w warunkach hałasu impulsowego nie jest jeszcze całkowicie wyjaśnione. Zwykle jest ono większe w porównaniu z hałasem ciągłym, ale przy jednoczesnym działaniu hałasu ciągłego i impulsowego efekt końcowy może być mniejszy. Przyczyną tego może być zwiększona skuteczność odruchu obronnego mięśni śródusznych pod wpływem sumujących się pobudzeń. Często średnie maksimum TTS, zwłaszcza wytwarzanego przez wystrzały artyleryjskie, różni się od TTS wywoływanego stałym hałasem szerokopasmowym, tak że zamiast na 4000 Hz występuje na 6000 Hz. Najbardziej istotną różnicą pomiędzy skutkiem słuchowym wywołanym przez hałas impulsowy a hałasem o stałym poziomie jest liniowy wzrost efektu TTS w funkcji czasu ekspozycji dla hałasu impulsowego, w odróżnieniu od wzrostu logarytmicznego dla hałasu o stałym poziomie. Dla hałasu impulsowego TTS rośnie znacznie szybciej niż po ekspozycji na hałas ciągły i osiąga większe wartości, bardzo szybko dochodząc do wartości asymptotycznej.

Jednoznaczna relacja pomiędzy TTS a trwałym przesunięciem progu słyszenia (PTS) nie jest znana [143]. Uważa się, że zależność ta jest osobniczo zróżnicowana. Jeśli jednak narażenie na uraz akustyczny trwa dłuższy czas i powtarza się systematycznie, może dojść do trwałego obniżenia progu słuchowego (ang. *Permanent Threshold Shift*, PTS) [29][202].

3.2.2. Trwały ubytek słuchu – PTS

Biorąc pod uwagę liczne doświadczenia nad badaniami ubytków słuchu wywołanych hałasem, możliwe jest przedstawienie cech charakterystycznych urazu typu PTS [141]:

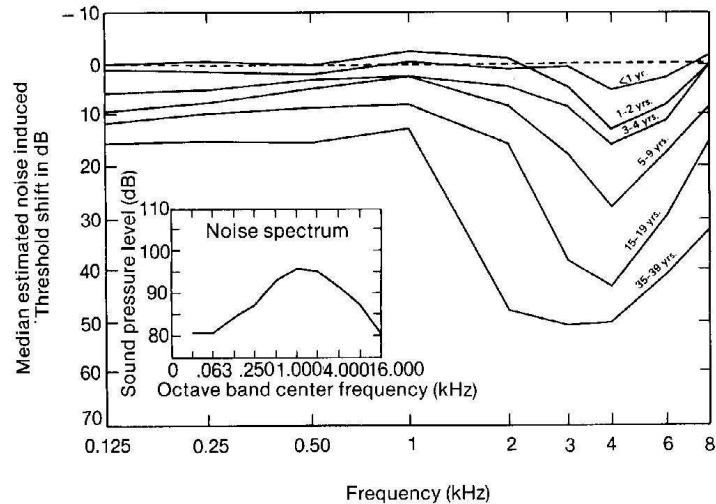
- zawsze odbiorczy,
- bardzo często obuuszny i symetryczny,
- nie powoduje głębokich ubytków słuchu,
- przy zaprzestaniu ekspozycji nie pogłębia się,
- większość poważnych ubytków przypada na około 4 kHz (3 ÷ 6 kHz częściej niż 500 Hz ÷ 2 kHz),
- maksymalny ubytek występuje po 10 ÷ 15 latach ekspozycji,
- hałas ciągły bardziej uszkadza słuch niż hałas nieregularny.

Odbiorcze uszkodzenie słuchu jest spowodowane uszkodzeniem ucha wewnętrznego (ślimaka) i/lub nerwu słuchowego. Cechy charakterystyczne dla odbiorczego upośledzenia słuchu dotyczą:

- słabszego rozumienia mowy przy stosunkowo dobrym słyszeniu tonów prostych,
- znacznego pogorszenia rozumienia mowy w hałasie, przy współistnieniu wielu źródeł dźwięku,
- lepszego słyszenia dźwięków niskich niż wysokich w życiu codziennym,
- nieprzyjemnego odczuwania dźwięków bardzo głośnych w uchu z niedosłuchem,
- różnego odczuwania wysokości tego samego dźwięku w obu uszach,
- ubytki słuchu wywołane hałasem są często konsekwencją wieloletniej ekspozycji na głośne dźwięki,
- występują powszechnie,
- są powodowane nie tylko przez hałasy przemysłowe,
- często mają charakter czasowego lub trwałego przesunięcia progu słyszenia,

- mogą również mieć formę czasowych lub trwałych szumów usznych (tinnitus).

Na rysunku 3.7 przedstawiono proces pogłębiania się ubytku słuchu wywołanego hałasem na skutek wieloletniej ekspozycji [141].



Rys. 3.7. Ubytki słuchu wywołane hałasem. Zmiana progu słyszenia w zależności od czasu narażenia na hałas [141]

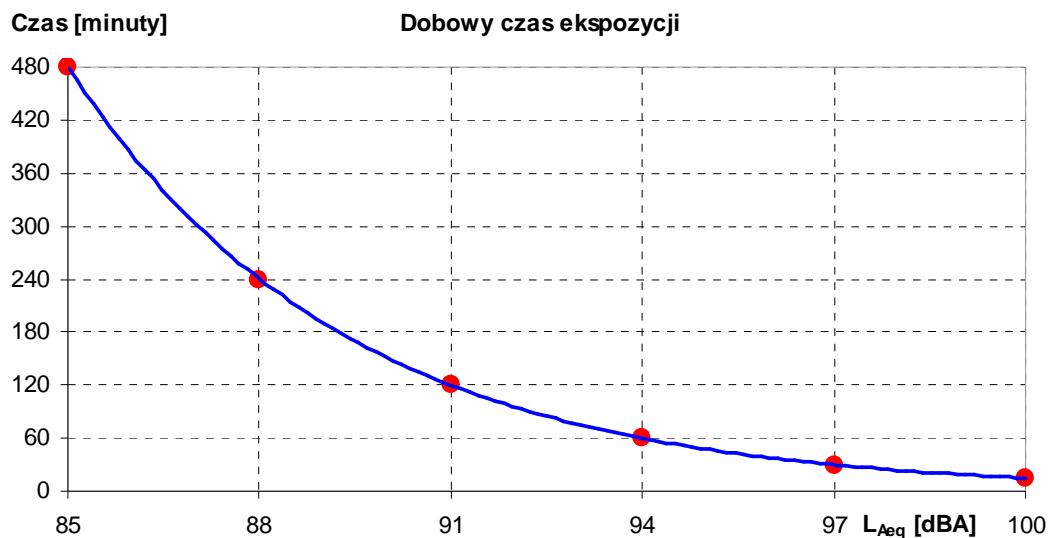
3.3. Hipoteza równoważności energii

Związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy wysokim poziomem hałasu występującym w środowisku pracy a ubytkami słuchu jest powszechnie znany [135]. W połowie XX wieku opracowano pierwsze modele opisujące relacje pomiędzy poziomem hałasu, jego czasem trwania a ubytkami słuchu, które wywołuje [200]. Modele te stanowiły podstawę do opracowania standardów w zakresie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku pracy [110][201]. Dalsze badania osób narażonych na różnego rodzaju hałas w środowisku pracy doprowadziły do sformułowania hipotezy równoważności energii (ang. *Equal Energy Hypothesis*, EEH). Jej najistotniejsze cechy wyrażają następujące stwierdzenia [74]:

- równa ilość energii powoduje jednakowy stopień uszkodzenia słuchu,
- uszkodzenie słuchu jest proporcjonalne do pewnej funkcji energii akustycznej, ta funkcja może być nieliniowa,
- istnieje relacja pomiędzy czasem ekspozycji a poziomem hałasu, relacja ta jest związana całkowitą energią akustyczną.

Podstawową zaletą tej hipotezy jest jej prostota, która przejawia się w łatwości jej implementacji w systemach pomiarowych. Stanowi również podstawę przy

formułowaniu różnorodnych norm. Na rysunku 3.8 przedstawiono wykres dopuszczalnego poziomu hałasu w funkcji czasu ekspozycji. Dwukrotnemu zwiększeniu poziomu hałasu odpowiada skrócenie dopuszczalnego czasu ekspozycji o połowę. Należy przy tym dodać, że poziom hałasu wyrażony jest równoważnym poziomem dźwięku, korygowanym krzywą A. Dla tego parametru poziom wymiany wynosi 3 dB (tzn., skrócenie czasu o połowę jest spowodowane wzrostem poziomu równoważnego dźwięku o 3 dB) [33].



Rys. 3.8. Dopuszczalny poziom hałasu w funkcji czasu ekspozycji (na podstawie hipotezy równoważności energii)

Poniżej zamieszczono obliczenie wartości poziomu wymiany dla założenia podwojenia energii akustycznej (wzory 3.1 ÷ 3.3).

Niech X oznacza poziom wymiany przy podwojeniu energii akustycznej, wówczas:

$$10 \cdot \log_{10}(A/B) + X = 10 \cdot \log_{10}(2 \cdot A/B) \quad (3.1)$$

$$X = 10 \cdot \log_{10}(2 \cdot A/B) - 10 \cdot \log_{10}(A/B) \quad (3.2)$$

$$X = 10 \cdot \log_{10}(2) = 10 \cdot (0,301) = \mathbf{3,01} \text{ [dB]} \quad (3.3)$$

W niektórych krajach do oceny dopuszczalnego poziomu hałasu wykorzystuje się poziom średni, w tym przypadku poziom wymiany wynosi 5 dB [179]. Hipoteza ta, od początku powstania wzbudza liczne kontrowersje. Wielu badaczy w swoich pracach starało się zweryfikować ją zarówno w warunkach rzeczywistego narażenia na hałas w środowisku pracy, jak i w kontrolowanych warunkach akustycznych z wykorzystaniem

różnych zwierząt laboratoryjnych [16][45][74][113][125]. Uzyskiwane w tych doświadczeniach wyniki dowodzą niezbicie, że proces powstawania ubytków słuchu jest bardzo złożony. Zwiększenie czasu trwania hałasu o danym poziomie powoduje przesuwanie się maksymalnego ubytku w stronę wyższych częstotliwości, zaś zwiększenie poziomu hałasu wywołuje bardziej rozległe i o wyższych poziomach ubytki słuchu [64]. Oznacza to, że istnieją poważne różnice w skutkach oddziaływania hałasu, a opisywanie ich za pomocą zasady równoważności energii jest dużym uproszczeniem [143]. Ponadto, jak wspomniano wcześniej, hałas impulsowy powoduje większe przesunięcie progu słyszenia niż hałas ciągły o tej samej energii. Ta cecha dźwięku zdaje się mieć istotny wpływ na zwiększone ryzyko powstania uszkodzenia słuchu [16][74][150]. Zwraca się przy tym uwagę, że do oceny hałasu impulsowego konieczne jest uwzględnienie dodatkowych parametrów charakteryzujących przebiegi impulsowe takie jak: poziom szczytowy ciśnienia akustycznego, czas narastania i czas trwania impulsu, rozkład energii w widmie, liczba impulsów i czas odstępu pomiędzy impulsami, kurtoza, energia impulsu [98][158].

Obecnie w wielu krajach dopuszczalnym, ze względu na ochronę słuchu, poziomem hałasu jest wartość 85 dBA, wyrażona poziomem równoważnym odniesionym do ośmiogodzinnego dnia pracy. Zakłada się przy tym, że powstałe skutki słuchowe powinny zaniknąć tego samego dnia po zakończeniu pracy. Okazuje się jednak, że różnorodna aktywność pozazawodowa, często wiążąca się z przebywaniem w hałasie, może już w takim przypadku stanowić zagrożenie dla słuchu [135]. Dlatego szczególnie niebezpieczną sytuacją jest łączenie ekspozycji na hałas w środowisku pracy z dodatkową, nadmierną ekspozycją w czasie wolnym. Sytuacje takie prowadzą do skumulowanego, negatywnego oddziaływania hałasu na słuch.

4. METODY POMIARU UBYTKÓW SŁUCHU

Treść niniejszego rozdziału stanowi opis metod pomiaru ubytków słuchu zastosowanych w badaniach wpływu hałasu na słuch, przeprowadzonych przez autora niniejszej rozprawy. Biorąc pod uwagę cel tego typu badań, wyróżnić można: badania mające na celu wykrycie wady słuchu (określane mianem badań przesiewowych) oraz badania diagnostyczne, których celem jest potwierdzenie i możliwie dokładne ustalenie stopnia ubytku słuchu. Metody badania słuchu, ze względu na udział pacjenta, można z kolei podzielić na: obiektywne, w których zdolność słyszenia oceniana jest bez świadomego udziału osoby badanej i subiektywne, wymagające świadomej współpracy pacjenta w czasie przeprowadzania badania [118].

Często, aby dokonać wiarygodnej diagnozy stanu słuchu, zachodzi konieczność łączenia poszczególnych metod możliwych do użycia w celu uzyskania krzyżowego potwierdzenia rozpoznania [97].

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane techniki i metody badania słuchu. Kryterium wyboru związane jest z wykorzystaniem danej metody w badaniach słuchu przeprowadzonych przez autora niniejszej rozprawy.

4.1. Metody subiektywne

4.1.1. Audiometria tonalna

Audiometria – jest to badanie mające na celu określenie progu słyszenia na drodze powietrznej i kostnej obu uszu osoby badanej. Jako bodziec stosowany jest ton prosty. Badanie to nie jest obiektywną metodą oceny wartości progu słyszenia. Najogólniej mówiąc związane jest ze świadomą reakcją pacjenta na bodźce dźwiękowe. Reakcja ta decyduje o wiarygodności i dokładności wyników badania audiologicznego. Audiometria zaliczana jest do psychofizycznych metod diagnostycznych, wśród których wyróżnia się: audiometrię tonalną i audiometrię słowną.

Audiometria tonalna jest to najczęściej stosowane badanie słuchu w gabinetach laryngologicznych. Osoba badana znajduje się w specjalnie izolowanym i wytłumionym pomieszczeniu (kabinie ciszy) i odpowiada po usłyszeniu dźwięku. Badanie polega na podawaniu do ucha osoby badanej tonów o zadanych częstotliwościach na drodze przewodnictwa powietrznego, a następnie kostnego. Osoba badana zakłada słuchawki

na uszy i sygnalizuje najcichsze natężenie tonu, który słyszy. Wynikiem badania jest audiogram, na którym pokazany jest próg słyszenia.

Próg słyszenia może być badany przez stopniowe wzmacnianie tonu (metoda wstępująca), bądź jego osłabienie (metoda zstępująca). Najmniejsza wartość słyszalnego tonu w całym paśmie częstotliwości od 250Hz do 8KHz pozwala wyznaczyć próg słyszenia pacjenta.

W niniejszej rozprawie, w przeprowadzonych badaniach wpływu hałasu na słuch zastosowano audiometrię tonalną. Dokładny sposób przeprowadzonych badań przedstawiono w rozdziale 6.

4.1.2. Audiometria mowy

Z audiometrią mowy związane są zasadniczo dwa rodzaje progów. Pierwszy z nich to próg detekcji mowy (ang. *Speech Detection Threshold*, SDT; *Speech Awareness Threshold*, SAT). Definiowany on jest jako najniższy poziom sygnału, dla którego mowa jest słyszana przez 50 % czasu. Drugim rodzajem progów jest próg rozumienia mowy (ang. *Speech Recognition Threshold*, *Speech Reception Threshold*, SRT) definiowany jako najniższy poziom, przy którym mowa jest rozumiana lub identyfikowana przez 50 % czasu [37].

Materiał słowny, który jest prezentowany podczas pomiarów audiometrycznych może być zróżnicowany. Dla przykładu mogą to być logatomy, wyrazy jednosylabowe, dwusylabowe lub zdania. Rodzaj materiału słownego, a przede wszystkim poziom ciśnienia prezentowanego dźwięku wpływają bezpośrednio na stopień rozumienia. Sygnały testowe można prezentować słuchaczowi na dwa sposoby. Pierwszy polega na odtwarzaniu materiału słownego, natomiast drugi sposób polega na tym, że materiał słowny jest odczytywany na bieżąco przez osobę prowadzącą test. W obu przypadkach materiał fonetyczny powinien zostać zrandomizowany.

Istnieje wiele znormalizowanych procedur prowadzenia testów audiometrii słownej, w których wyznacza się wartości progowe. Ich cechą wspólną jest to, że najpierw dokonuje się zgrubnego wyznaczenia wartości progowej, a następnie wyznacza się wartość progową w sposób dokładny. Ze względu na ograniczoną liczbę punktów pomiarowych, zakres pomiaru można zwiększyć poprzez zastosowanie metody interpolacyjnej.

W odróżnieniu od pomiaru wartości progowej SDT lub SRT, który polegał na wyznaczeniu pojedynczej wartości pomiarowej, wyznaczenie audiogramu mowy polega

na określeniu szeregu wartości pomiarowych pozwalających na wykreślenie krzywej będącej wykresem zrozumiałości mowy w funkcji poziomu mowy. Materiał słowny wykorzystywany do pomiarów audiogramów mowy może być taki sam, jak w przypadku materiału wykorzystywanego do wyznaczania wartości progowych. Ważne jest, aby listy słów wykorzystywanych w testach były zrównoważone fonetycznie. Zrównoważenie fonetyczne polega na tym, że częstotliwość pojawiania się poszczególnych fonemów w teście jest proporcjonalna do częstotliwości pojawiania się tych fonemów w mowie potocznej [37].

Audiometria mowy w szumie

W przypadku, gdy testy audiometryczne mowy przeprowadzane są z wykorzystaniem szumu maskującego ucho badane, mamy wówczas do czynienia z tzw. audiometrią mowy w szumie. Wprowadzony celowo szum maskujący utrudnia rozumienie mowy. Na audiogramach objawia się to tym, że klasyczne audiogramy mowy uzyskane bez udziału szumu są „przesuwane” w prawo o wartość równą poziomowi szumu maskującego. Jednak dzięki dodaniu szumu maleją wymagania odnośnie wyciszenia pomieszczeń, w których prowadzone są badania słuchu, co pozwala na ich prowadzenie np. na terenie szkół i zakładów pracy [37].

4.2. Metody obiektywne

4.2.1. Otoemisja akustyczna

Liczne badania przeprowadzane na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat w znacznym stopniu wpłynęły na rozwój teorii dotyczącej funkcjonowania ślimaka. Udowodniono, że ślimak bierze czynny udział zarówno w procesie odbioru dźwięków, jak i ich generacji. Kemp, jako pierwszy w 1978 r. dokonał rejestracji w przewodzie słuchowym zewnętrznym dźwięków wytworzonych przez ucho wewnętrzne. Sygnały te określane są jako otoemisje akustyczne.

Odkrycie otoemisji pociąga za sobą istotne implikacje. Przede wszystkim dowodzi, że ślimak jest elementem, wewnątrz którego zachodzą procesy aktywne [2][169]. Badania eksperymentalne przeprowadzane na zwierzętach, jak również wyniki badań klinicznych dowiodły, że komórki rzęskowe zewnętrzne posiadają właściwości elektroruchowe [14][43][48]. Cecha ta odgrywa główną rolę w procesie generacji otoemisji akustycznych. Wykazano ponadto, że otoemisje odzwierciedlają funkcjonowanie obwodowego układu słuchowego, a zatem są wrażliwe na czynniki

mogące powodować różnego rodzaju patologie [12][211]. Uzasadnione jest zatem twierdzenie, że sygnały otoemisji akustycznej są istotne w kontekście kompleksowego badania narządu słuchu, w szczególności do badania różnorodnych skutków słuchowych wywołanych hałasem [10][12][50][62][92][101][152][180].

Komórki rzęskowe zewnętrzne stanowią źródło energii mechanicznej, która za pośrednictwem układu kosteczek jest przekazywana zwrotnie do błony bębenkowej wytwarzającej sygnał akustyczny. Umieszczenie w przewodzie słuchowym zewnętrznym czułego mikrofonu umożliwia rejestrację generowanych sygnałów, które następnie poddawane są specjalistycznej analizie.

Sygnały otoemisji akustycznej, ze względu na sposób ich powstawania, podzielić można na dwie zasadnicze grupy:

- otoemisje spontaniczne – powstające w układzie słuchowym bez udziału dodatkowej stymulacji akustycznej,
- otoemisje wywołane – występujące w następstwie stymulacji bodźcem akustycznym. Rodzaj zastosowanego sygnału pobudzającego (impuls, ton prosty, dwuton) stanowi podstawę dalszej klasyfikacji.

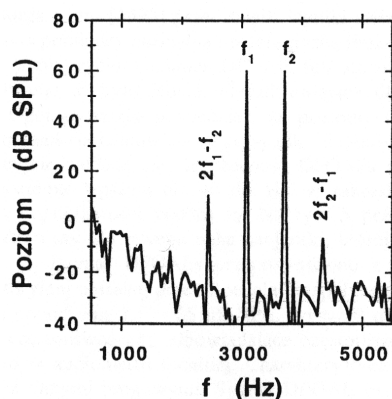
Otoemisje akustyczne wywołane impulsami (*Clic-Evoked Otoacoustic Emissions - CEOAE*)

Otoemisja akustyczna wywołana trzaskiem znalazła obecnie najszersze zastosowanie. Sonda pomiarowa składa się z miniaturowej słuchawki, generującej sygnały akustyczne oraz miniaturowego mikrofonu, który dokonuje rejestracji sygnału obecnego w przewodzie słuchowym. Sygnały otoemisji wywołanej impulsem występują u niemal 100 % osób o słuchu prawidłowym w szerokim zakresie wiekowym (od noworodków po osoby w wieku około 60 lat). Otoemisje stanowią odzwierciedlenie funkcji części obwodowej układu słuchowego i generalnie rzecz ujmując - są niezależne od funkcjonowania części ośrodkowej układu słuchowego [101].

Otoemisje akustyczne produktów zniekształceń nieliniowych ślimaka (*Distortion Product Otoacoustic Emissions - DPOAE*)

Otoemisje akustyczne zniekształceń nieliniowych ślimaka zostały opisane przez Kempa wkrótce po opublikowaniu prac poświęconych otoemisji wywołanej trzaskiem. Powstają one w wyniku równoczesnego pobudzenia dwoma impulsami tonalnymi (są to tzw. tony pierwotne) o nieznacznie różniących się częstotliwości. Sonda do pomiaru DPOAEs zawiera dwie miniaturowe słuchawki, z których każda emituje pojedynczy ton

o częstotliwości f_1 lub f_2 . Stosunek częstotliwości f_2 do f_1 waha się w granicach od 1,18 do 1,25. Zazwyczaj wynosi 1,22, czyli tony pierwotne są oddzielone od siebie o około 1/3 oktawy. Czas trwania bodźca (dwuton) wynosi około 1 - 4 sek. Sygnał z mikrofonu poddawany jest ciągłemu procesowi uśredniania podczas prezentacji bodźca, co zapewnia poprawę stosunku sygnału do szumu. Zarejestrowany sygnał poddawany jest analizie widmowej (FFT) [101]. W efekcie procesów nieliniowych zachodzących w zdrowym ślimaku generowane są sygnały, będące kombinacjami częstotliwości f_1 lub f_2 , tzw. produkty zniekształceń nieliniowych. Najsilniejszy sygnał DPOAE powstaje dla częstotliwości określonej zależnością $2 \cdot f_1 - f_2$. Badania wskazują, że ten produkt zniekształceń powstaje w miejscu zbliżonym bądź odpowiadającym największemu wychyleniu błony podstawnej dla częstotliwości f_2 . Zatem badając sygnał $2 \cdot f_1 - f_2$, otrzymuje się informację na temat funkcjonowania ślimaka w tym rejonie częstotliwości. Rysunek 4.3 przedstawia przykładowe widmo sygnału DPOAE uzyskanego za pomocą systemu laboratoryjnego w uchu noworodka [185].



Rys. 4.3 Przykładowe widmo DPOAE [185]

Widmo to zawiera szerokopasmowe tło odpowiadające szumowi zakłóceń oraz dwa prążki odpowiadające tonom o częstotliwościach 3076 i 3711 Hz, emitowanym przez słuchawki. W wyniku procesów nieliniowych zachodzących w ślimaku ucho wytwarza nowe, dodatkowe częstotliwości, będące kombinacjami częstotliwości f_1 i f_2 . Są one widoczne w widmie w postaci prążków występujących dla częstotliwości $2 \cdot f_1 - f_2$ (2441 Hz) oraz $2 \cdot f_2 - f_1$ (4346 Hz), reprezentujących DPOAE. Zdrowe ucho ludzkie wytwarza najsilniejszy sygnał DPOAE dla częstotliwości $2 \cdot f_1 - f_2$. Metoda DPOAE pozwala więc na obiektywne zbadanie funkcjonowania ucha wewnętrznego w precyzyjnie określonym rejonie częstotliwości.

Specyfika bodźców stosowanych w metodzie DPOAE sprawia, że istnieje wiele możliwości w zakresie zmian parametrów testu. Zmianie podlegać mogą:

- wartość częstotliwości f_1 i f_2 oraz ich stosunek,
- poziom ciśnienia akustycznego L_1 i L_2 odpowiadający bodźcom o częstotliwościach f_1 i f_2 . Badania wykazały, że w niektórych przypadkach korzystne jest zastosowanie bodźców, dla których wartość L_1 jest wyższa od wartości L_2 o 6 - 15 dB.

W metodzie DPOAE typowo stosuje się dwie procedury:

- tzw. DP - gram; stosunek częstotliwości f_1 do f_2 jest niezmienny podczas trwania testu, a częstotliwości bodźców f_1 i f_2 są zmieniane skokowo w skali logarytmicznej z rozdzielczością 2 - 8 punktów na oktawę; wartości L_1 i L_2 są stałe w ramach danego testu,
- funkcja wzrostu DPOAE; częstotliwości bodźców f_1 i f_2 są niezmiennie w ramach danego testu; wartości L_1 i L_2 są zmieniane skokowo co 2 -5 dB w zakresie 20 - 70 dB SPL; funkcje wzrostu mierzy się dla 6 - 10 wybranych par f_1 i f_2 , a następnie określa nachylenia funkcji oraz najmniejsze wartości L_1 i L_2 , dla których sygnał DPOAE jest wykrywalny na tle szumu.

Uważa się, że DPOAE występuje niemal u wszystkich osób o słuchu prawidłowym. Dotychczasowe badania nie wykazały systematycznych różnic pomiędzy poziomami DPOAE zmierzonymi dla grup kobiet i mężczyzn oraz pomiędzy uchem lewym i prawym. Stwierdzono jednak istnienie dużych różnic międzyosobniczych, co stwarza konieczność opracowania norm opartych na dużej populacji osób o słuchu prawidłowym. Poziom DPOAE jest u noworodków nieco wyższy niż u osób dorosłych. Ogólnie można powiedzieć, że poziomy DPOAE ulegają zmniejszeniu lub zanikają całkowicie w przypadku ubytków zmysłowo-nerwowych. Tradycyjnie zakłada się, że obecność DPOAE sugeruje, iż próg słuchu jest na poziomie lepszym niż 40 dB HL w zakresie częstotliwości odpowiadającym częstotliwości bodźca f_2 .

Zastosowanie kliniczne otoemisji akustycznych

Technika wywołanych otoemisji akustycznych jest:

- nieinwazyjna (wymaga jedynie umieszczenia sondy w przewodzie słuchowym),
- obiektywna i dokładna, nie jest wymagana współpraca ze strony pacjenta, a uzyskane informacje wiernie odzwierciedlają funkcjonowanie ślimaka,
- stosunkowo łatwa w realizacji (pomiar dokonywany jest automatycznie, w krótkim czasie, przy łóżku pacjenta lub na sali operacyjnej) [185].

Głównym czynnikiem niezbędnym do prawidłowego przeprowadzenia pomiaru DPOAE jest odpowiednie umieszczenie sondy w przewodzie słuchowym zewnętrznym. Zatkanie sondy woskowiną lub jej kontakt ze ścianą przewodu uniemożliwiają utrzymanie wymaganych parametrów bodźca stymulującego oraz wpływają na charakterystykę toru pomiarowego. Nieszczelne dopasowanie sondy do przewodu powoduje zmniejszenie poziomu bodźca stymulującego. Zwiększa się przy tym poziom zakłóceń w przewodzie słuchowym. Przy dopasowaniu sondy badanie można przeprowadzić w cichym pomieszczeniu. Zakłócenia fizjologiczne takie jak; oddech, ruchy głową, przełykanie, mowa - stanowią źródła artefaktów, które można częściowo wyeliminować za pomocą odpowiedniej techniki analizy. Zdarzają się jednak sytuacje, w których poziom zakłóceń fizjologicznych znacznie utrudnia lub wręcz uniemożliwia przeprowadzenie badania. Szczególnie trudne jest wyeliminowanie zakłóceń w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 1 kHz), w którym zawiera się największa część energii szumów fizjologicznych.

4.3. Badania przesiewowe

Badania mające na celu wykrycie wady słuchu określa się mianem badań przesiewowych. Powinny być obiektywne oraz być przeprowadzane w sposób szybki i względnie prosty. Dodatkowo powinny umożliwiać przeprowadzenie selekcji w możliwie wczesnym wieku. Ważnymi cechami tego typu testów jest ich niski koszt oraz podawana w % czułość, określająca efektywność wyodrębniania z całej populacji osób posiadających ubytki słuchu. Spotykane dotychczas metody przesiewowe można podzielić na trzy grupy. Do pierwszej z nich zalicza się metody wykorzystujące wyłącznie ankiety zawierające pytania do osoby badanej lub do osób z jej środowiska (np. rodziców). Druga grupa metod opiera się na pomiarach fizjologicznych i audiometrycznych (badanie potencjałów wywołanych pnia mózgu - ABR, badanie wykorzystujące istnienie otoemisji akustycznej [97][118]). Trzecia grupa metod zawiera testy, w których stosuje się zarówno ankiety, jak i badania pomiarowe. Opracowany w Katedrze Systemów Multimedialnych we współpracy z Instytutem Fizjologii i Patologii Słuchu i wdrożony w 1999 r. test przesiewowy „Słyszę...” zaliczyć można do ostatniej grupy [37].

4.3.1. Multimedialny system przesiewowych badań słuchu „Słyszę...”

W 1999 r. opracowano i uruchomiono kompleksowy serwis www poświęcony problematyce fizjologii, diagnostyki, profilaktyki i patologii słuchu. Serwis ten, uruchomiony pod nazwą „Słyszę...”, składa się z dwóch podstawowych modułów: modułu informacyjnego i modułu diagnostycznego. Moduł informacyjny stanowi interaktywne kompendium wiedzy z zakresu fizjologii, diagnostyki, profilaktyki i patologii słuchu. Moduł diagnostyczny umożliwia prowadzenie zdalnego, komputerowego badania słuchu przy użyciu trzech metod: ankiety elektronicznej, audiometrycznego testu trójtonowego oraz badania rozumienia mowy w szumie przygotowanego osobno dla dwóch grup wiekowych w postaci testu obrazkowego i testu słownego [183]. Autor niniejszej rozprawy brał udział w badaniach kalibracji i wstępnych testach prezentowanego systemu.

Badania przesiewowe słuchu systemem „Słyszę...” zostały zapoczątkowane w latach 1999-2000. Testy przesiewowe były wykonywane w wybranych szkołach na terenie całego kraju. Badania te były ukierunkowane na zbadanie jak największej grupy dzieci i młodzieży w wieku od 7 do 19 lat. Z tego powodu zdecydowano się na przeprowadzenie badania w szkołach w oparciu o ten system.

Przebieg badania

W badaniach wykorzystywano komputer typu *laptop*, oprogramowanie systemu „Słyszę...” oraz specjalne słuchawki wyposażone w kalibrator poziomego sygnału. Seria testów każdorazowo rozpoczynała się od przygotowania komputera do badań. Badanie właściwe poprzedzała krótka ankieta. Część pierwsza ankiety zawierała pytania o dane osobowe osoby badanej, wiek, płeć, rodzaj szkoły oraz informacje dodatkowe o miejscu zamieszkania, takie jak: województwo, miasto, gęstość zaludnienia. Część druga ankiety dotyczyła własnej opinii badanego na temat jego słuchu w typowych sytuacjach życiowych. Po wypełnieniu ankiety badany mógł wybrać typ badania: test tonalny (dla wszystkich), test słowny jednosylabowy (dzieci starsze, młodzież i dorośli), test słowny dwusylabowy ilustrowany (dzieci młodsze). Procedura testu polegała na wykonaniu testu tonalnego oraz, zależnie od wieku badanego, odpowiedniego testu słownego. Po wykonaniu badania system automatycznie analizuje wyniki i wyświetla stosowne komunikaty.

Rodzaje testów

Test tonalny polegał na podaniu trzech sygnałów tonalnych o częstotliwościach 1000, 2000 i 4000 Hz o poziomie 25 dB HL. Kolejne sygnały tonalne były przedzielane fragmentami ciszy. Kolejność poszczególnych sygnałów tonalnych oraz fragmentów ciszy były prezentowane w sposób losowy. Zadaniem badanego było udzielanie odpowiedzi przez wciśnięcie klawisza „spacja” każdorazowo, gdy usłyszał dźwięk. W ten sposób uzyskiwano 6 odpowiedzi (3 x „Słyszę” i 3 x brak odpowiedzi dla sygnału ciszy). Test był wykonywany niezależnie dla lewego i prawego ucha. W tabeli 6.3 zestawiono kryteria decyzyjne dla poszczególnych rodzajów testów.

Tabela 6.3. Kryteria decyzyjne dla poszczególnych rodzajów testów w systemie „Słyszę...”

Rodzaj testu	Wynik testu	Ocena testu	Uwagi
Tonalny	Wszystkie odpowiedzi poprawne	Zaliczony	Dla wszystkich
	Co najmniej jeden błąd	Powtórka testu, jeśli drugi raz - test nie zaliczony	Dla wszystkich
Test słowny jednosylabowy	$100\% \geq x > 80\%$	Zaliczony	Dzieci powyżej 7 klasy szkoły podstawowej, młodzież i dorośli
	$80\% \geq x > 60\%$	Nie zaliczony - badany może mieć problemy ze słuchem	
	$100\% \geq x > 70\%$	Zaliczony	Młodsze dzieci do 7 klasy szkoły podstawowej
	$70\% \geq x > 60\%$	Nie zaliczony - badany może mieć problemy ze słuchem	
	$x \leq 60\%$	Nie zaliczony - badany ma problemy ze słuchem	Dla wszystkich
Test słowny dwusylabowy (ilustrowany)	$100\% \geq x > 85\%$	Zaliczony	Test dla najmłodszych dzieci
	$85\% \geq x > 70\%$	Nie zaliczony - badany może mieć problemy ze słuchem	
	$x \leq 70\%$	Nie zaliczony - badany ma problemy ze słuchem	

Test słowny jednosylabowy polegał na prezentowaniu kolejno 20 wyrazów wypowiedzianych przez lektora z dodanym szumem. Po każdym wypowiedzianym słowie, osoba badana musiała wybrać wyraz, który usłyszała, spośród czterech prezentowanych na ekranie. Możliwa była również odpowiedź „Nie wiem”. Test słowny dwusylabowy różnił się jedynie przykładami dźwiękowymi. Możliwe odpowiedzi były prezentowane również w formie obrazków. W testach słownych maksymalny wynik to 100 % w przypadku wszystkich odpowiedzi prawidłowych.

4.3.2. Gromadzenie i wizualizacja danych epidemicznych

W tabeli 6.9 zestawiono analizę 65756 wyników całościowego badania przesiewowego. Obejmowało ono test tonalny oraz test słowny, jednowyrazowy. Wprowadzono podział pod względem szkoły, zamieszczono również wyniki uzyskane dla testów wykonanych przez Internet.

Tabela 6.9. Wyniki testu przesiewowego systemem „Słyszę...”. Test tonalny i słowny jednowyrazowy

Typ testu				Rodzaj szkoły						Internet
Tonalny		Słowny		A	B	C	D	E	F	
Z	NZ	Z	NZ							
X		X		13889	16632	769	2885	5767	78	11332
	X	X		2125	1706	81	234	573	13	1255
X			X	511	1379	99	234	371	8	982
	X		X	1254	1661	142	215	461	8	1092
Liczba badanych				17779	21378	1091	3568	7172	107	14661
Dla grupy, która nie zaliczyła testu tonalnego i zaliczyła test słowny										
Jedno ucho				957	869	34	132	275	4	635
Oba uszu				1167	836	47	102	258	9	616
Dla grupy, która zaliczyła test tonalny i nie zaliczyła testu słownego										
Może mieć				388	1306	90	223	349	7	903
Ma				123	73	9	11	22	1	79
Dla grupy, która nie zaliczyła testu tonalnego i słownego										
Jedno ucho				426	684	63	101	187	1	435
Oba ucha				828	977	79	113	247	7	659
Może mieć				641	1413	115	185	414	8	827
Ma				613	246	27	30	47	0	265

Rodzaje rozpatrywanych szkół: A – podstawowa, B – gimnazjum, C – zawodowa, D – technikum, E – liceum, F – wyższa

Wyniki pokazują, że średnio około 23 % badanych nie przeszło testu przesiewowego. Niespełna 8 % nie zaliczyła obu części testu. Dla tej grupy badanych częściej stwierdzono nie zaliczenie testu tonalnego dla obu uszu, niż dla grupy, która nie zaliczyła jedynie testu tonalnego. Może to wynikać z faktu, iż uszkodzenie w obu uszach znacząco utrudnia rozumienie mowy w warunkach maskowania i może być przyczyną trudności w nauce [198]. Ponadto, w tej grupie osób stwierdzono więcej

przypadków wskazujących na poważniejsze nieprawidłowości w funkcjonowaniu narządu słuchu niż w grupie, która nie zaliczyła jedynie testu słownego. Analiza wyników ankiety jest zgodna z wynikami testu przesiewowego. W grupie badanych, którzy nie zaliczyli testu częściej sygnalizowano problemy ze słuchem w życiu codziennym, w tym 65 procent ankietowanych stwierdziło, że nie miało badanego słuchu.

Uzyskiwane wyniki badań audiometrycznych słuchu i wyniki badań testem przesiewowym „Słyszę...” stanowiły motywację do przeprowadzenia zintensyfikowanych badań nakierowanych na badanie słuchu i hałasu wśród dzieci i młodzieży, gdyż był to jeden z najczęściej podawanych w ankietach czynnik zagrożenia słuchu.

5. MULTIMEDIALNY SYSTEM MONITOROWANIA HAŁASU

W niniejszym rozdziale przedstawiono projekt i praktyczną realizację teleinformatycznego systemu monitorowania zagrożeń hałasem. Stanowi on główną platformę do rzeczywistej implementacji zaproponowanych przez autora niniejszej rozprawy metod oceny szkodliwości hałasu. Przedstawiono szczegółowo elementy funkcjonalne systemu ze szczególnym uwzględnieniem tych, które stanowią osobisty wkład autora niniejszej rozprawy. Treść tego rozdziału stanowi również dowód tezy 1 rozprawy.

Celem projektu realizowanego w Politechnice Gdańskiej jest opracowanie powszechnego systemu monitorowania klimatu akustycznego ze szczególnym uwzględnieniem wpływu zagrożeń hałasowych na słuch oraz monitorowania różnorodnych zdarzeń akustycznych. Tego typu rozwiązania dostępne na rynku cechuje wysoka cena oraz brak możliwości poszerzania o nowe funkcje analizy sygnału akustycznego. Elastyczność i otwarta architektura pozwalają na łatwe integrowanie proponowanych rozwiązań z istniejącymi systemami monitoringowymi. Urządzenia pomiarowe są zaprojektowane w taki sposób, by zapewniały maksymalną funkcjonalność przy niskich kosztach powielania.

Uregulowania prawne nakazują walkę z hałasem poprzez opracowywanie wieloletnich strategii w oparciu o mapy hałasu przedstawiające uśredniony rozkład poziomu dźwięku na analizowanym obszarze za okres całego roku. W praktyce może się ono okazać jednak niewystarczające, głównie dlatego, że nie uwzględnia krótkookresowych zmian w rozkładzie klimatu akustycznego. Ponadto istnieje wiele czynników akustycznych, których strategiczne mapy hałasu nie uwzględniają. Należą do nich np.: aktywność ludzi w obiektach użyteczności publicznej, położonych blisko zabudowy mieszkalnej, hałaśliwe kluby, imprezy plenerowe, zmiany w organizacji ruchu, itp.

Opierając się na raportach, prezentujących wyniki badań odnoszące się do stopnia zagrożenia hałasem, można stwierdzić, że jest ono niezwykle wysokie. W naszym kraju poziom hałasu szczególnie szybko narasta. Na tę niekorzystną sytuację składa się wiele czynników, do których należy zaliczyć: rosnący ruch uliczny, zwiększającą się liczbę samochodów [51][52], mała liczba autostrad i obwodnic, które powodują, że natężenie ruchu pojazdów w miastach nadmiernie wzrasta, zwiększa się ruch tranzytowy

samochodów ciężarowych. Należy zauważyć, że opracowywany system monitorowania hałasu może doskonale uzupełnić system dynamicznego sterowania ruchem pojazdów. Optymalizacja wykorzystania istniejącej infrastruktury drogowej poprzez inteligentne sterowanie ruchem pojazdów, prowadzone w oparciu o analizę natężenia ruchu i poziom emisji hałasu, może przyczynić się do znacznej poprawy klimatu akustycznego. Ponadto, istniejące uregulowania prawne nakazują z jednej strony przygotowywanie strategicznych map hałasu, z drugiej zaś podejmowanie inicjatyw zmierzających do poprawy sytuacji w zakresie zwalczania hałasu. Należyta realizacja tych zadań wymaga prowadzenia rzeczywistego dozoru akustycznego. Bez wykorzystania bazy stale działających stacji pomiarowych, rzetelna weryfikacja podjętych działań może być bardzo trudna do przeprowadzenia. Prezentowany w niniejszym rozdziale Multimedialny System Monitorowania Hałasu umożliwia pozyskiwanie i prezentowanie informacji o aktualnym poziomie hałasu w środowisku aglomeracji miejskiej.

Opracowywany i wdrożony do badań pilotażowych projekt systemu monitorowania klimatu akustycznego i zagrożeń hałasem jest przedsięwzięciem interdyscyplinarnym, wykorzystującym najnowsze osiągnięcia technologiczne. Posiada budowę modułową. W niniejszym rozdziale przedstawiono poszczególne elementy funkcjonalne systemu, w opracowaniu których brał udział autor niniejszej rozprawy.

5.1. Ogólne założenia projektowe systemu

Ogólne założenia projektowe zostały sformułowane pod kątem funkcji realizowanych przez opracowany system z uwzględnieniem oczekiwań przyszłych użytkowników systemu. Położono szczególny nacisk na zapewnienie jak największej ergonomii i prostoty obsługi. Poniżej zestawiono główne założenia, którymi kierowano się w trakcie prac nad systemem:

- możliwość prowadzenia długookresowych pomiarów hałasu,
- możliwość bezprzewodowego przesyłania wyników i nadzoru stacji pomiarowych,
- system hałasowy dostępny dla szerokiego grona użytkowników za pośrednictwem serwisu internetowego,
- czytelny i prosty w obsłudze interfejs użytkownika aplikacji internetowej do prezentacji zgromadzonych wyników pomiarów hałasu (zarówno obiektywnych – pomiary poziomu hałasu, jak i subiektywnych – ankiety internetowe),
- możliwość prowadzenia subiektywnych pomiarów uciążliwości hałasu w oparciu o elektroniczne ankiety,

- możliwość dynamicznego tworzenia mapy rozkładu poziomu hałasu na analizowanym obszarze w oparciu o numeryczny model terenu, wyniki rzeczywistych pomiarów poziomu hałasu oraz wykorzystanie modelu propagacji dźwięku w przestrzeni otwartej,
- dodatkowy serwis informacyjny, zawierający podstawowe informacje z zakresu ochrony przed hałasem.

Przyjęcie wyżej podanych, ogólnych założeń, wymagało wyróżnienie szeregu odrębnych elementów funkcjonalnych. Umożliwia to stworzenie systemu w formie połączonych ze sobą modułów, które można w znacznym stopniu rozbudowywać i kształtować według aktualnych i przewidywanych potrzeb. Zamieszczone poniżej rozdziały dotyczą głównych elementów opracowanego systemu.

5.2. Architektura systemu

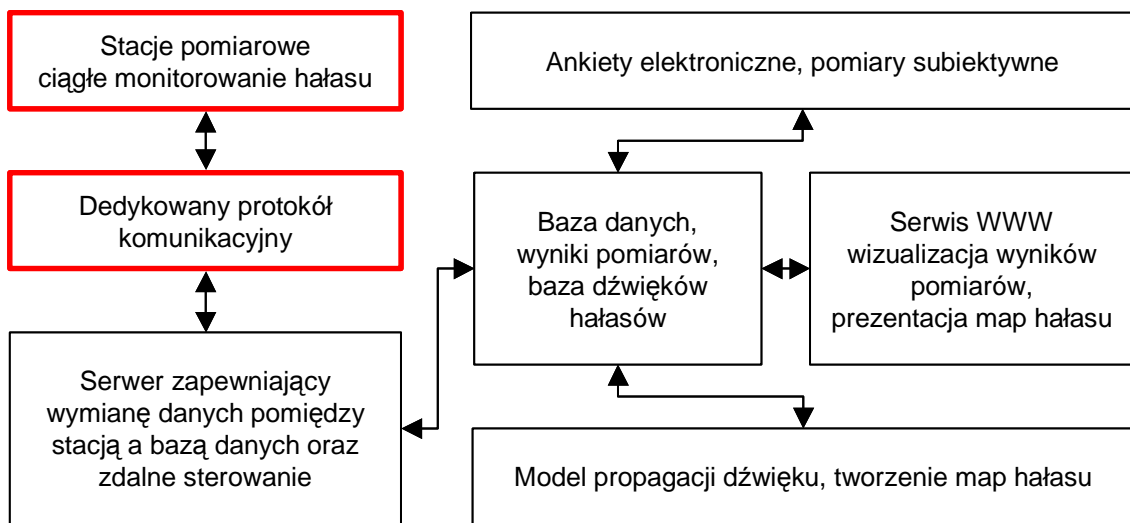
Multimedialny System Monitorowania Hałasu tworzy szereg współpracujących ze sobą elementów funkcjonalnych. Należą do nich:

- autonomiczna stacja pomiarowa wyposażona w wszechpogodowy mikrofon pomiarowy,
- serwer zapewniający komunikację pomiędzy urządzeniami pomiarowymi a bazą danych oraz administratorem systemu, za pomocą specjalnie opracowanych protokołów,
- baza danych wyników pomiarów oraz informacji uzupełniających,
- cyfrowy model terenu do symulacji propagacji dźwięku w przestrzeni otwartej,
- opracowania informatyczne umożliwiające tworzenie dynamicznych map hałasu z wykorzystaniem modułów obliczeniowych, które zostały opracowane w ramach projektów europejskich HARMONOISE oraz IMAGINE [159],
- moduł umożliwiający prezentację na stronach internetowego serwisu hałasowego obliczoną mapę hałasu,
- hałasowy serwis WWW,
- dodatkowe programy do sterowania i nadzoru stacji pomiarowych.

Monitorowanie klimatu akustycznego zostało zrealizowane za pomocą dedykowanych stacji pomiarowych. Wyposażono je w odpowiednie oprogramowanie do analizy hałasu. Umożliwiają nieprzerwany pomiar wymaganych ustawowo parametrów hałasu. Zapewniają bezobsługową pracę, zdalny nadzór oraz

bezprzewodową transmisję wyników do centralnej bazy danych. Dzięki temu można w szybki i prosty sposób tworzyć mapy przedstawiające aktualny stan klimatu akustycznego na rozpatrywanym obszarze.

System pomiarowy hałasu składa się z: urządzenia USB, zawierającego mikrofon pomiarowy, służącego do akwizycji próbek hałasu. Urządzenie to można podłączyć do dowolnego komputera posiadającego interfejs USB. Kolejny element struktury pomiarowej to program komputerowy wyznaczający parametry hałasu zgodnie z obowiązującymi normami. Aplikacja ta współpracuje z wymienionym wyżej urządzeniem USB oraz kolejną częścią systemu, którą jest internetowy serwis WWW wraz z dedykowaną bazą danych. Na potrzeby zdalnego i ciągłego monitorowania hałasu w wybranych punktach pomiarowych opracowywane urządzenie wyposażono w modem GPRS umożliwiającą bezprzewodową transmisję wyników do bazy danych systemu. Na rys. 5.1 przedstawiono ogólny schemat Multimedialnego Systemu Monitorowania Hałasu.



Rys. 5.1. Ogólny schemat Multimedialnego Systemu Monitorowania Hałasu

Bloki na schemacie z rys. 5.1. wyróżnione kolorem czerwonym zostały w znacznej części zrealizowane przez autora niniejszej rozprawy. Należą do nich: projekt i realizacja stacji monitorowania hałasu wraz z oprogramowaniem pomiarowym oraz protokół komunikacyjny, wykorzystywany do przesyłania wyników pomiarów i odbierania komunikatów sterujących. Pozostałe elementy zostały zrealizowane w ramach prac dyplomowych i projektowych realizowanych w Katedrze Systemów Multimedialnych. Autor niniejszej rozprawy brał czynny udział w procesie ich

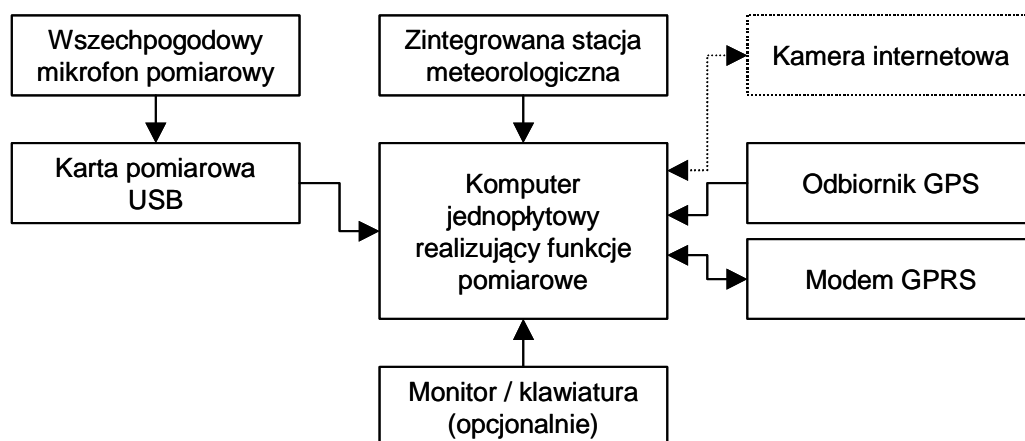
powstawania, głównie jako koordynator w zakresie opracowywania koncepcji oraz testowania i weryfikowania uzyskanych rezultatów praktycznych.

5.3. Stacja pomiarowa

5.3.1. Budowa

Wybór platformy sprzętowej, zastosowanej do realizacji funkcji pomiarowych był poprzedzony analizą kosztów i czasu wymaganego na implementację. Rozważano zastosowanie specjalizowanych procesorów sygnałowych do wykonywania analizy sygnału hałas. Ostatecznie jednak, ze względu na konieczność zintegrowania w stacji pomiarowej wielu różnych niespecyficznych dla analizatora hałasu funkcji, zdecydowano się na zastosowanie komputera jednopłytkowego (np. GX1LCD w pierwszej wersji stacji, aktualnie JRex-PM). Ten rodzaj implementacji sprzętowej systemu pomiarowego został wybrany ze względu na bardzo dużą uniwersalność i elastyczność funkcjonalną. Komputer jednopłytkowy jest dostarczany z kompletem interfejsów obejmujących: standardową kartę sieciową, porty szeregowy RS232, porty USB i inne. Wybrany komputer jest zgodny ze standardem 80x86, dzięki czemu możliwe jest zainstalowanie systemu operacyjnego np. Window lub Linux. Istnieje ponadto bardzo duża prostota w tworzeniu oprogramowania z wykorzystaniem typowych narzędzi programistycznych (VisualC++, Borland C++, KDevelop). Ogromną zaletą tego typu platformy jest jej uniwersalność umożliwiająca implementację najnowszej wersji oprogramowania. Proces testowania oprogramowania na platformie docelowej również jest ograniczony do minimum z uwagi na fakt, iż można go w pełni przeprowadzić bezpośrednio w wykorzystywanym środowisku programistycznym. Ze względu na chęć ograniczenia kosztów do minimum zdecydowano się na zastosowanie systemu operacyjnego Linux, co pozwala m.in. uniknąć dodatkowych nakładów związanych z zakupem licencji. Pomimo, że wybrany komputer jednopłytkowy jest wyposażony w moduły konwersji analogowo-cyfrowej, to jednak nie spełnia on wymagań jakościowych w taki sposób, aby mógł być wykorzystany jako interfejs pomiarowy. Zdecydowano, iż interfejs pomiarowy będzie stanowił odrębne urządzenie, komunikujące się z komputerem poprzez szynę USB. Karta pomiarowa USB jest w istocie dedykowanym interfejsem dźwiękowym opracowanym w Katedrze Systemów Multimedialnych. Urządzenie zbudowano w oparciu o kontroler strumieniowy USB Texas Instruments TAS1020B, który nadzoruje transmisję poprzez USB, jak również pełni rolę interfejsu dla konwertera analogowo-

cyfrowego [26]. Informacji dotyczących pozycji geograficznej dostarcza odbiornik GPS Altina GGM308, połączony z komputerem Kontron za pośrednictwem jednego z dwóch dostępnych portów szeregowych. Drugi port szeregowy jest wykorzystywany do komunikacji z modemem GPRS, który umożliwia z jednej strony wysyłanie danych pomiarowych, z drugiej zaś pozwala użytkownikowi dokonywać konfiguracji stacji monitorującej. Schemat blokowy proponowanego rozwiązania przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Schemat blokowy stacji monitorującej hałas środowiskowy

Sygnal wejściowy próbkowany jest z częstotliwością 48 kHz przez 24-bitowy przetwornik Texas Instruments PCM1802. Dzięki temu możliwy jest pomiar hałasu w odpowiednio dużym zakresie dynamiki. Karta pomiarowa nie tylko pełni funkcje analogowego, jak i cyfrowego interfejsu dźwiękowego, ale również dostarcza odpowiednich napięć polaryzujących dla mikrofonu pomiarowego. Chociaż możliwe jest wykorzystanie każdego z dostępnych na rynku mikrofonów pomiarowych z wyprowadzeniami w standardzie LEMO7, to przewidziano, iż docelowo stacja współpracować będzie z mikrofonem wszechpogodowym firmy SONOPAN WK21WP.

Dla zapewnienia wykonywania długookresowych pomiarów hałasu zaprojektowano specjalną obudowę, której zadaniem jest ochrona urządzeń pomiarowych przed wpływem zmiennych i niekorzystnych czynników środowiskowych. Uwzględniono również konieczność zabezpieczenia stacji pomiarowej przed nieautoryzowanym dostępem osób nieuprawnionych.

W aktualnej postaci wybrane stacje pomiarowe zostały wyposażone w zestaw zintegrowanych czujników do pomiaru wielkości meteorologicznych takich, jak: temperatura, ciśnienie, wilgotność, prędkość i kierunek wiatru. Parametry atmosferyczne mają zasadnicze znaczenie dla określenia wiarygodności uzyskanych

parametrów hałasu. Dodatkowo, zmierzone parametry meteorologiczne są wykorzystywane w procesie modelowania propagacji hałasu w obszarze aglomeracji miejskiej. Przewidziano również bardziej rozbudowaną wersję stacji pomiarowej, wyposażoną w kamerę cyfrową. Pozwala to na wyznaczenie parametrów dźwięku (np. poziom hałasu) oraz jednoczesną identyfikację źródła dźwięku (np. samochód osobowy, ciężarowy, pociąg). Parametry ruchu pojazdów (prędkość, liczba pojazdów, rodzaj pojazdu), pozyskane na drodze analizy obrazu pochodzącego z kamery, umożliwiają dokładne i automatyczne określenie poziomu emisyjnego źródła hałasu (droga, linia kolejowa). Dzięki temu możliwe jest tworzenie efektywnych map hałasu wykorzystujących modele źródła oraz właściwości propagacji dźwięku, bazujące na numerycznej mapie aglomeracji.

Dane te mogą być wykorzystane do modelowania emisji hałasu za pomocą dedykowanych aplikacji dostępnych na rynku (np. w systemie CadnaA). Ponadto, równoczesny, rzeczywisty pomiar hałasu pochodzącego od identyfikowanego źródła hałasu pozwala na natychmiastową weryfikację danych uzyskanych za pomocą oprogramowania do modelowania hałasu. Uzyskano dzięki temu brakujące ogniwo, będące swoistym sprzężeniem zwrotnym w procesie wyznaczania zarówno emisji, jak i emisji hałasu. Dzięki temu uzyskiwane wyniki są wiarygodne.

W bardziej złożonej wersji, stacja umożliwia ciągłą analizę klimatu akustycznego i to nie tylko przez wyznaczanie wymaganych w normach parametrów, lecz również przez zastosowanie autorskiego algorytmu do określania negatywnego oddziaływania hałasu na stan słuchu osób nań narażonych. Uniwersalna architektura stacji sprawia, że zestaw zewnętrznych czujników może być niemal dowolnie rozbudowywany. Możliwe jest zatem podłączenie urządzenia do pomiaru stężenia pyłu zawieszonego (o dowolnej frakcji, PM 10, PM 2,5). Zagadnienie to jest jednak zbyt obszerne i w bezpośredni sposób nie dotyczy zagadnienia pomiaru hałasu i jego szkodliwego oddziaływania. Z tego powodu dodatkowe funkcjonalności systemu nie będą omawiane w niniejszej rozprawie.

5.3.2. Działanie

Do podstawowych funkcji stacji pomiarowej należą z oczywistych względów te, które są wymagane dla każdego miernika hałasu środowiskowego, aby mógł on uzyskać świadectwo legalizacji Głównego Urzędu Miar [172]. Jednak proponowane rozwiązanie posiada rozszerzoną funkcjonalność, tak by pomiary mogły się odbywać w sposób

ciągły i dodatkowo, aby do ich prowadzenia nie był konieczny bezpośredni nadzór nad urządzeniami w terenie. System pomiarowy jest oparty na miniaturowym, wydajnym, jednopłytkowym komputerze przemysłowym [42]. Jak wspomniano w rozdziale 5.3, urządzenie wyposażono w moduł pozycjonowania satelitarnego GPS, który pozwala na powiązanie wyników pomiarów poziomu hałasu z danymi dotyczącymi lokalizacji miejsca, w którym dany pomiar się odbył. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych technologii transmisji bezprzewodowej GPRS/UMTS, udostępnianych w formie usług przez operatorów sieci komórkowej (lub też WIMAX udostępnianej w ramach współpracy urzędu miasta Gdańska z firmą Intel), możliwe staje się przesłanie wspomnianych danych do centralnego systemu teleinformatycznego, którego zadaniem jest ich gromadzenie oraz odpowiednie przetwarzanie. Możliwe jest również podłączenie stacji pomiarowej do lokalnej sieci komputerowej za pomocą wbudowanej karty sieciowej. Dla zapewnienia właściwej komunikacji pomiędzy stacją pomiarową a bazą danych opracowano specjalny serwer obsługujący komunikację ze stacjami pomiarowymi (demon akwizycji danych). Został on zaimplementowany w języku C++. Opracowany protokół komunikacyjny umożliwia przesyłanie danych pomiarowych, kontrolnych i sterujących.

Przy zastosowaniu proponowanej metodologii pomiarów mapy hałasowe mogą być tworzone niemalże natychmiastowo, a ponadto system zbudowany w oparciu o odpowiednią liczbę stacji pomiarowych pozwala na ich praktycznie stałą aktualizację. W podobny sposób, czyli zdalnie i bez przerywania pomiarów, można dokonywać wszelkich zmian w konfiguracji urządzenia, tak by odpowiadała ona konkretnym potrzebom użytkownika.

Opracowywane rozwiązania cechuje duża elastyczność zastosowań. Ze względu na niskie koszty i automatyczne, bezobsługowe działanie, możliwe jest instalowanie stacji pomiarowych nie tylko w okolicach ruchliwych ulic, lecz również w sąsiedztwie hałaśliwych klubów, na terenie zakładów pracy, w których pracownicy narażeni są na wysoki poziom hałasu, w szkołach.

5.3.3. Wyznaczane parametry hałasu

Aktualnie mierzone parametry hałasu odpowiadają najnowszym wymogom ustawodawczym UE w zakresie długookresowych pomiarów hałasu [46]. Stacja pomiarowa umożliwia również dokonywanie wstępnej analizy statystycznej wyników. Możliwe jest zatem wyznaczanie histogramów oraz rozkładów skumulowanych oraz

poziomów statystycznych. W tabeli 5.1 przedstawiono listę parametrów wyznaczanych przez omawianą stację monitorowania hałasu. Zamieszczono również listę parametrów środowiskowych możliwych do wyznaczenia po zastosowaniu dodatkowych elementów funkcjonalnych. Kolorem czerwonym wyróżniono możliwość wyznaczania nowych parametrów szkodliwości hałasu, zdefiniowane w niniejszej rozprawie w rozdziale 7.5.

Tabela. 5.1. Parametry hałasu wyznaczane przez stację pomiarową

Parametry czasowe	Poziom dźwięku (wartość chwilowa oraz SPL), Poziom MIN, MAX, Poziom L_{pk} , niezależnie dla trzech stałych czasowych S/F/I dla wybranej krzywej korekcyjnej A/C/L
Parametry normatywne	Równoważny poziomy dźwięku
	Średni równoważny poziomy dźwięku (czas uśredniania – 1 h)
	Średni równoważny poziomy dźwięku – pora dzienna, L_D (godz.: 6 – 18)
	Średni równoważny poziomy dźwięku – pora wieczorna, L_E (godz.: 18 – 22)
	Średni równoważny poziomy dźwięku – pora nocna, L_N (godz.: 22 – 6)
	Średni równoważny poziomy dźwięku (24 h)
	Średni równoważny poziomy dźwięku L_{DEN}
Widmo tercjowe	Analiza w oparciu o bank filtrów tercjowych
Histogramy	Dla wybranego parametru czasowego
Rozkłady skumulowane	Dla wybranego parametru czasowego, wyznaczanie poziomów statystycznych L_x
Dawka hałasu	Dzienna dawka hałasu wyrażona w %
Nowe parametry szkodliwości hałasu	Parametry szkodliwości hałasu zdefiniowane w niniejszej rozprawie

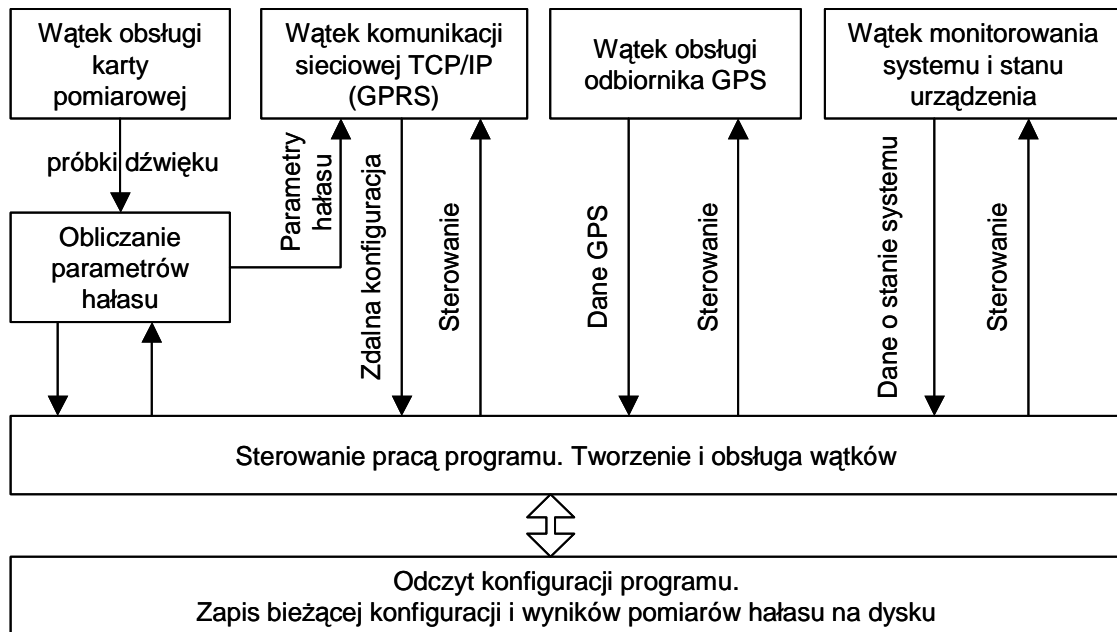
Stacja pomiarowa umożliwia również wyznaczanie poziomu hałasu w pasmach tercjowych. Pełni zatem rolę analizatora widma. W ten sposób wyznaczone parametry mogą być wykorzystane do modelowania propagacji dźwięku w przestrzeni otwartej. Mogą efektywnie wspomagać proces tworzenia map hałasu. Należy zaznaczyć, że wymagane charakterystyki korekcyjne (A/C), zrealizowano po stronie cyfrowej, wykorzystując do tego celu filtrację widmową. Takie podejście daje pewność doskonałej stabilności odwzorowywanych charakterystyk. Ponadto uzyskiwane w procesie obliczeniowym współczynniki widmowe są podstawą do wyznaczania dodatkowych parametrów hałasu, uwzględniających psychofizjologiczne aspekty ludzkiego słuchu.



Rys. 5.3. Stacja pomiarowa wraz z mikrofonem pomiarowym

Stacja pomiarowa pozwala również na wykonywanie pomiarów w ruchu, co predestynuje ją do instalacji na różnego rodzaju pojazdach, autobusach, tramwajach, wagonach kolejowych. Możliwe wówczas staje się monitorowanie hałasu wzdłuż głównych linii komunikacyjnych i określenie miejsc, w których zagrożenie hałasowe jest największe. Może to prowadzić do takiego kierowania ruchem drogowym, aby poziom hałasu wydatnie obniżyć.

Jak wspomniano wcześniej, oprogramowanie stacji pomiarowej zrealizowano w systemie operacyjnym Linux. Umożliwia ono analizę hałasu w czasie rzeczywistym z zastosowaniem autorskich algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnału. Dzięki temu można efektywnie wskazać miejsca zagrożone hałasem, szczególnie uciążliwe dla mieszkańców. Wszelkie dane systemowe oraz wyniki pomiarów są umieszczane na dysku typu Compact Flash. Ponadto, możliwe jest zastosowanie dodatkowych, przenośnych pamięci masowych, podłączanych za pośrednictwem złącza USB. Oprogramowanie to współpracuje z dedykowanym systemem baz danych, powiązanych z systemem informacji przestrzennej (GIS) [188]. Mapy hałasu są tworzone w oparciu o rzeczywiste wyniki pomiarów, wspomagane modelowaniem propagacji dźwięku w przestrzeni otwartej. Na rys. 5.4 przedstawiono schematycznie wielowątkową strukturę oprogramowania zaimplementowanego w omawianej stacji pomiarowej.



Rys. 5.4. Struktura oprogramowania stacji pomiarowej [42]

Stacja pomiarowa odbiera komunikaty o lokalizacji z odbiornika GPS w standardzie NMEA 0183 [206]. Standard ten definiuje wiele różnych komunikatów, umożliwiających uzyskanie dokładnych informacji o pozycji odbiornika oraz aktualnym układzie satelitów. Dla zastosowań w opracowanej stacji pomiarowej ograniczono się do obsługi komend GGA (*Global Positioning System Fix Data*) i GSV (*Satellites in view*) [206]. Umożliwiają one określenie pozycji odbiornika (GGA) oraz liczby aktualnie widocznych satelitów wraz z informacją o ich bieżącym położeniu oraz poziomie odbieranego sygnału (GSV). Poniżej zamieszczono przykładowe komendy odczytane z odbiornika.

```
$GPGGA,180803.617,5422.2198,N,01836.8064,E,1,05,4.2,92.4,M,,,,0000*34
$GPGSV,3,1,09,23,82,185,37,24,61,233,45,20,54,111,33,13,51,232,45*75
```

Ze względu na konieczność szybkiego przesyłania specyficznych danych opracowano dedykowany protokół komunikacyjny, działający w oparciu o standard TCP/IP. Protokół ten umożliwia przesyłanie wcześniej zdefiniowanych komunikatów. Zawierają one między innymi wyniki pomiarów powiązane z czasem oraz pozycją geograficzną stacji pomiarowej. Możliwe jest również przesyłanie komunikatów sterujących oraz informacje dodatkowe o aktualnym stanie i działaniu stacji. Komunikacja pomiędzy stacją a serwerem MSMH odbywa się z potwierdzeniem.

Ostatni wątek realizuje funkcje diagnostyczne. W procesie tym w sposób ciągły monitorowana jest praca systemu operacyjnego i programu wyznaczającego parametry hałasu. Sprawdzana jest temperatura procesora i płyty głównej. Aktualizacji podlega również ustawienie sprzętowego zegara typu „*watchdog*”. W przypadku wystąpienia zakłóceń w pracy systemu stacja samoczynnie wznawia inicjalizację. Wszelkie zmiany w ustawieniach zapisywane są na lokalnym dysku, dzięki czemu, po ponownym uruchomieniu, stacja działa poprawnie i wysyła oczekiwane wyniki. Wyznaczone parametry hałasu są również zapisywane na dysku i mogą być odczytywane na żądanie serwera. Istnieje ponadto możliwość instalacji dodatkowego dysku działającego w oparciu o interfejs USB, dzięki czemu mogą być gromadzone wyniki dla długich przedziałów czasowych. Takie rozwiązanie stanowi alternatywę dla połączenia bezprzewodowego, wymaga jednak dodatkowych czynności związanych z obsługą dysku USB.

5.3.4. Badanie stacji

Kalibracja

W celu kalibracji stacji zastosowano standardową procedurę, stosowaną w przypadku mierników poziomu dźwięku. Sygnałem wzorcowym był ton o częstotliwości 1 kHz i poziomie 94 dB. Źródłem sygnału wzorcowego był kalibrator akustyczny firmy Brüel&Kjær, typ 4231. W opracowanej stacji pomiarowej proces kalibracji jest bardzo prosty. Wystarczy umieścić kalibrator na mikrofonie, uruchomić go, a następnie włączyć kalibrację w stacji pomiarowej.

Przyjęto założenie, że w czasie wykonywania kalibracji na wyjściu mikrofonu pomiarowego jest właściwy sygnał wyjściowy, odpowiadający sygnałowi wzorcowemu o poziomie 94 dB i częstotliwości 1 kHz.

Podczas kalibracji analizowana jest wartość RMS sygnału wzorcowego, jeśli zmienia się ona w czasie 1 sekundy o więcej niż 0,1 dB, to kalibracja jest przerywana i kończy się niepowodzeniem z powodu braku stabilności amplitudy sygnału wzorcowego. Jeśli zaś poziom sygnału wzorcowego nie zmienia się, to wówczas porównywane są wartości RMS dla aktualnego poziomu wejściowego z wartością odniesienia równą 94 dB. W przypadku braku zgodności w poziomach obu wartości obliczana jest nowa wartość wzmocnienia tak, by wyjściowy poziom RMS dla danego sygnału wzorcowego wynosił 94 dB. Kalibracja kończy się zapisaniem aktualnych ustawień do pliku.

Testy

Opracowane urządzenie zostało poddane testom elektrycznym z wykorzystaniem systemu pomiarowego TWO firmy Audio Precision. Wejście karty pomiarowej było obciążone impedancją zastępczą mikrofonu. Zmierzona efektywna dynamika karty pomiarowej wynosi 87 dB. Maksymalny poziom szczytowy, który był przetwarzany bez obawy o przesterowanie wynosił 125 dB. Na tej podstawie określono następujący zakres pomiarowy: dla parametrów L_{Leq} , L_{Aeq} , L_{Ceq} : 35 ÷ 122 dB. Dla wartości szczytowej zakres pomiarowy wynosi 40 ÷ 125 dB. Zakres odniesienia jest równy zakresowi pomiarowemu. Stacja pomiarowa posiada pojedynczy zakres pomiarowy. Błąd liniowości karty pomiarowej dla zakresu odniesienia wynosi +/- 0,1 dB. Zmierzony poziom szumów własnych wynosi odpowiednio: $L_{LS} = 22$ dB, $L_{AS} = 17,3$ dB, $L_{CS} = 16,2$ dB. Błędy odwzorowania charakterystyk korekcyjnych dla zakresu od 40 do 20000 Hz wynoszą +/- 0,1 dB. Nieco większe różnice w stosunku do charakterystyk idealnych zaobserwowano dla najniższych częstotliwości. Maksymalny błąd dla charakterystyki A wynosił: 0,4 dB przy częstotliwości sygnału wejściowego 10 Hz. Odpowiednio dla krzywej C: 0,7 dB. Dla charakterystyki liniowej tłumienie przy tej częstotliwości sygnału wynosiło: 0,9 dB. Dokładne wyniki badania stacji pomiaru hałasu z uwzględnieniem szacowania niepewności złożonej i rozszerzonej typu B zamieszczono w załączniku 1.

Stacja pomiarowa wymaga zasilania z zewnętrznego źródła o napięciu 12 V. Całkowity pobór mocy wynosi nie więcej niż 10 W. Po włączeniu zasilania jest gotowa do pracy w ciągu dwóch minut.

5.4. Protokoły komunikacji

Do poprawnej komunikacji pomiędzy stacjami pomiarowymi a centralnym serwerem systemu hałasowego opracowano dedykowany protokół komunikacyjny. Jego działanie opiera się na wykorzystaniu protokołu TCP/IP. Wybór tego protokołu był podyktowany koniecznością zapewnienia wysokiej jakości połączenia, wolnego od błędów w transmisji danych.

Rozważano również inne sposoby przesyłania danych, np. w formie binarnej. Po przeprowadzeniu testów działania na różnych platformach okazało się, że taki sposób przesyłania danych prowadzi do powstawania przekłamań. Wynika to z faktu iż zastosowany do implementacji protokołu komunikacji język C nie definiuje, w jaki

sposób dane mają być przechowywane w postaci binarnej, a nawet nie definiuje ilości pamięci zajmowanej przez poszczególne typy danych w pamięci. Przykładowa reprezentacja bajtowa struktury binarnej wypełnionej danymi w systemie Solaris na platformie Sun wygląda następująco:

```
07 d5 10 16 04 c8 41 95 28 f6 42 59 89 37 42 80 3d 71 42 57 0a 3d
```

Natomiast te same dane w przypadku platformy x86 pod kontrolą systemu Linux są następującej postaci:

```
d5 07 10 16 e7 77 f6 28 95 41 37 89 59 42 71 3d 80 42 3d 0a 57 42
```

Wyraźnie widać odwrotną kolejność bajtów w kodowaniu typów wielobajtowych.

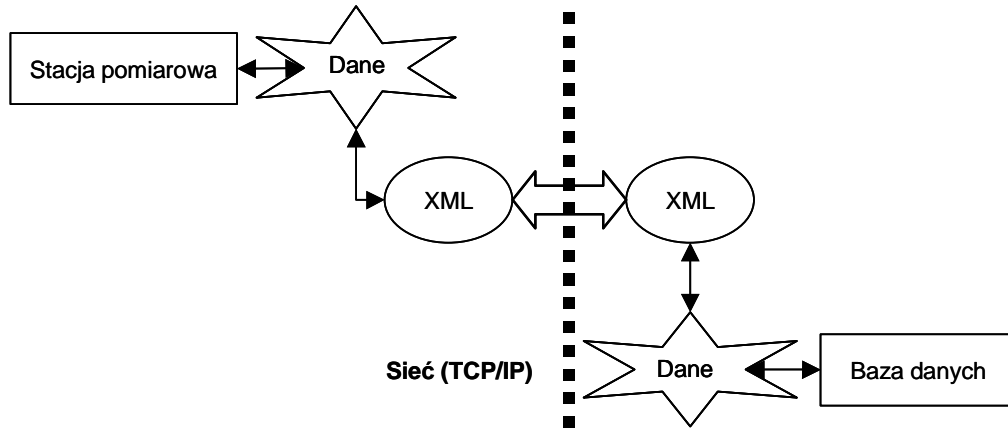
Ponieważ system ma działać na różnych platformach sprzętowych, niezgodność ta uniemożliwia użycie sposobu przesyłania danych w formie binarnej pomiędzy komputerami pracującymi na różnych platformach. Format zakodowanych danych musi być formatem otwartym – dobrze udokumentowanym. Najlepiej skorzystać z gotowego standardu. Język C nie definiuje sposobu, w jaki dane są przechowywane w pamięci, a więc format przesyłania danych może zmieniać się w zależności od platformy sprzętowej, programowej, wersji i opcji kompilacji, itp. Odkodowanie danych, bez posiadania pełnej informacji na temat sposobu reprezentacji binarnej może nie być możliwe.

Kolejnym sposobem przesyłania danych jest przesyłanie ich za pomocą formatu tekstowego z wykorzystaniem języka XML. Język XML (ang. *Extensible Markup Language*, XML) jest to system składni uniwersalnego języka znakujący dane poprzez tagi i atrybuty. Danymi może być zwykły tekst lub dane liczbowe, którym znakowanie nadaje formę strukturalną. Standardy XML są ustanawiane przez W3C. Rozwój XML jest związany z Internetem, jego zastosowania nie ograniczają się jednak do komunikacji poprzez WWW i są środkiem umożliwiającym wymianę danych pomiędzy różnymi systemami [54].

Format XML, dzięki swym uniwersalnym cechom, został wykorzystany do stworzenia protokołu wymiany danych w prezentowanym Systemie. Przesyłane dane umieszczane są wewnątrz znaczników języka XML. Dane liczbowe przesyłane są w reprezentacji dziesiętnej, dane tekstowe w otwartym tekście, a dane binarne jako tekst poddany kodowaniu transportowemu (z zastosowaniem np. uuencode, kodujący 8-bitowe dane binarne do formatu 7-bitowych ciągów znaków ASCII). Zaletą użycia języka XML jest możliwość dowolnego rozbudowywania protokołu o nowe rodzaje

danych, niezależność od platformy sprzętowej i programowej oraz łatwość zrozumienia przez człowieka danych przesyłanych w tym formacie.

Na rys. 5.5 schematycznie przedstawiono zasadę działania opracowanego protokołu komunikacji pomiędzy stacją pomiarową a bazą danych. Jako platformę wymiany danych wybrano format XML.



Rys. 5.5. Zasada działania komunikacji pomiędzy stacją pomiarową a serwerem z wykorzystaniem protokołu komunikacyjnego

Poniżej przedstawiono przykładową organizację pakietu XML, do przesyłania danych pomiarowych:

```
<DATA>
  <PACKET ... Wartość parametru 1... />
  <PACKET ... Wartość parametru 2... />
  .
  .
  <PACKET ... Wartość parametru n... />
</DATA>
<STAT>
  <PACKET ... Wartości statystyczne... />
</STAT>
```

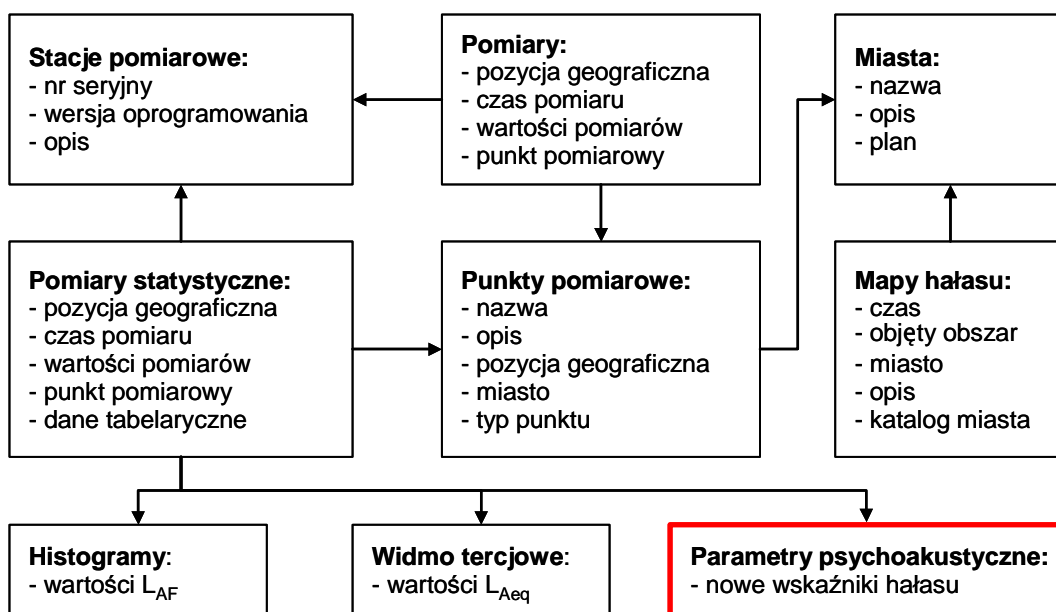
gdzie:

- <DATA> i <STAT> - znaczniki wewnątrz których przesyłane są dane poszczególne dane,
- <DATA> - zawierający bieżące dane pomiarowe,
- <STAT> - zawierający zbiorcze dane statystyczne,
- <PACKET> - znacznik do przesyłania poszczególnych porcji danych.

W jednym znaczniku <DATA> lub <STAT> można zawrzeć dowolną ilość znaczników <PACKET>.

5.5. Baza danych multimedialnego systemu monitorowania hałasu

Na potrzeby systemu opracowano dedykowaną bazę danych. Jej głównym zadaniem jest łatwe gromadzenie i efektywne przetwarzanie pozyskanych wyników pomiarów oraz pozostałych danych niezbędnych do działania wszystkich modułów systemu. Podstawowe typy danych obecnych w systemie stanowią: wyniki pomiarów hałasu i innych parametrów środowiska przesłane przez stacje pomiarowe, numeryczny model terenu wraz z informacjami na temat źródeł hałasu znajdującymi się na analizowanym obszarze, obliczone mapy hałasu oraz dane tworzone podczas działania serwisu WWW. Na rysunku 5.6 przedstawiono fragment struktury bazy danych odpowiedzialny za przechowywanie wyników pomiarów hałasu oraz tworzenie map hałasu. Kolorem czerwonym zaznaczono tabelę zawierającą nowe wskaźniki szkodliwości hałasu opracowane przez autora niniejszej rozprawy. Ich definicje oraz dokładny opis zostały zamieszczone w rozdziale 7.



Rys. 5.7. Struktura bazy danych MSMH do przechowywania wyników pomiarów hałasu i sporządzonych map hałas

Każdy z wymienionych wyżej typów danych charakteryzuje się odrębną specyfiką. Wymagał zatem opracowania specyficznych mechanizmów obsługi procesu dodawania i odczytywania danych. Poniżej zamieszczono szczegółowy opis poszczególnych tabel opracowanej bazy danych.

Tabela „Pomiary”

W tabeli przechowywane są wyniki przesłane przez poszczególne stacje pomiarowe. Zastosowanie wyżej opisanego protokołu komunikacji umożliwia wprowadzenie bezpośrednio odebranych danych bez konieczności dodatkowego ich modyfikowania. W tabeli tej zapisywane są podstawowe informacje o zmierzonym poziomie hałasu w powiązaniu z pozycją geograficzną i czasem wykonanych pomiarów. Dodatkowo zapisywana jest informacja o stacji, która wykonała i przesłała wyniki.

Punkt pomiarowy – jest to pole wskazujące, za pomocą relacji wiele do jeden, na punkt pomiarowy, który odpowiada miejscu, w którym wykonano pomiar. W przypadku, gdy pomiar nie jest przypisany do żadnego z punktów pomiarowych, należy umieścić w tej kolumnie wartość NULL. Może to mieć miejsce w przypadku mobilnego (ruchomego) punktu pomiarowego, lub gdy pozycja geograficzna danego pomiaru nie znajduje się w pobliżu żadnego ze zdefiniowanych punktów pomiarowych.

Stacje pomiarowe – jest to pole wskazujące, za pomocą relacji wiele do jeden, na stację pomiarową, która wykonała dany pomiar – relacja skierowana jest na odpowiedni rekord w tablicy stacji pomiarowych.

Tabela „Pomiary statystyczne”

Stacja pomiarowa, oprócz wartości chwilowych, dokonuje również analizy hałasu w długim przedziale czasu. Do przechowywania w ten sposób uzyskanych danych zaprojektowano dedykowaną tabelę. Zawiera ona podstawowe informacje identyfikujące czas i miejsce wykonania pomiaru. Są one przechowywane w następujących polach: (ID – unikatowy identyfikator pomiaru), punkt pomiarowy, jeżeli dane pobrano w znanym punkcie pomiarowym to zawiera jego identyfikator (relacja z tabelą „punkty pomiarowe”), stacja pomiarowa – identyfikator stacji pomiarowej, która wykonała pomiar (relacja z tabelą „stacje pomiarowe”), pozycja geograficzna, czas pomiaru. Główne parametry statystyczne przechowywane w tej tabeli, to: wartości minimalne, równoważne i maksymalne poziomów hałasu, widma tercjowe oraz histogramy. Stacja pomiarowa może przekazywać różnorodne dane statystyczne, w zależności od jej konfiguracji. W tabeli pomiary statystyczne są zapisywane jedynie numery rekordów zawierających konkretne wartości widma tercjowego, histogramu lub parametrów dodatkowych wyznaczanych za pomocą psychoakustycznego dozymetru hałasowego. Wartości tych parametrów są fizycznie przechowywane w dodatkowych

tabelach. Takie rozwiązanie pozwala na optymalne zagospodarowanie pamięci i stwarza możliwość łatwego przeglądania wybranych typów danych.

Tabela „Punkty pomiarowe”

W systemie monitorowania hałasu wprowadzono dwa sposoby prowadzenia pomiarów. Pierwszy zakłada czasowe zainstalowanie stacji monitorowania hałasu w wybranym punkcie miasta, o znanej pozycji geograficznej. Taki punkt określono jako punkt stacjonarny. Drugi rodzaj punktu to taki, który może być przemieszczany w obrębie miasta np. w dedykowanym do tego celu samochodzie. Ten rodzaj określono jako mobilny. W tym przypadku pozycja wykonania pomiaru jest określana za pomocą odbiornika sygnału GPS. Należy zwrócić uwagę na parametr pozycji geograficznej, który również znajduje się w tabeli pomiarów. W przypadku punktów stacjonarnych informacja o lokalizacji jest znana i parametr ten zawarty w tabeli „Pomiary” jest ignorowany. W przypadku mobilnych punktów pomiarowych lokalizacja punktu nie jest określona, lecz jest odczytywana właśnie z tabeli „Pomiary”. Rodzaj punktu jest znany w trakcie wykonywania pomiaru i informacja ta jest przekazywana przez stację monitorującą i zapisywana w tabeli, w kolumnie typ punktu. Każdy punkt jest ponadto charakteryzowany przez dodatkowe informacje zawarte w polach: nazwa, opis, miasto (identyfikator miasta, wskazuje na rekord przypisany danemu miastu w tabeli miast). W polach tych zawarto dokładne informacje o lokalizacji punktu, takie jak ulica, opis miejsca zainstalowania stacji. Tabela „Punkt pomiarowy” zawiera ponadto unikatowy identyfikator. Znajduje się on w kolumnie „punkt pomiarowy” w tabeli „pomiary” i według niego odszukiwany jest docelowy rekord relacji.

Tabela „Stacje pomiarowe”

Tabela zawiera dane o urządzeniach pomiarowych. Każdy egzemplarz urządzenia posiada własny rekord w tej tabeli. Każde urządzenie charakteryzowane jest przez:

ID – identyfikator, na który powołuje się rekord w tabeli „pomiary”,

nr seryjny – unikatowy numer egzemplarza urządzenia,

wersja – wersja oprogramowania zainstalowana w urządzeniu,

opis – opis tekstowy urządzenia.

Każdy pomiar w tabeli „pomiary” wskazuje na ID urządzenia, które ten pomiar wykonało. To ID wskazuje na parę zawierającą egzemplarz urządzenia, które dokonało pomiaru oraz wersję oprogramowania. W przypadku zmiany wersji oprogramowania

generowany jest nowy rekord w tabeli „stacje pomiarowe”, zawierający nowe ID, poprzedni numer seryjny urządzenia (który jest stały) oraz wersje nowego oprogramowania. Dzięki temu można dotrzeć do wersji oprogramowania, za pomocą której wykonano dany pomiar, co może być cenną informacją w przypadku wykrycia błędów w pewnych wersjach oprogramowania.

Tabela „Miasta”

Tabela zawiera dane o terenie, w którym prowadzone są pomiary. Każdy rekord, zawierający punkt pomiarowy, posiada identyfikator miasta, do którego jest przypisany. Dzięki temu możliwe jest pobranie punktów pomiarowych leżących w obrębie danego miasta. Rekord tabeli miasto zawiera dane GIS miasta, potrzebne do generowania mapy hałasu dla danego terenu. Kolumny tabeli „miasta”:

ID – identyfikator miasta. Unikatowa wartość identyfikatora służy do wskazywania rekordu, na który wskazuje relacja z tabeli „punkty pomiarowe”,

nazwa – tekstowa nazwa miasta,

opis – opis tekstowy miasta (uwagi, notatki),

plan – binarne dane GIS z informacjami o terenie.

Rekord danych miasta zawiera warstwy GIS potrzebne do wygenerowania na ich podstawie mapy hałasu. Z powodów optymalizacyjnych zdecydowano się umieścić całość danych GIS o mieście w jednym binarnym zbiorze danych. Inną możliwością byłoby utworzenie osobnej tabeli z danymi GIS miast, w której każdy rekord odpowiadałby jednemu elementowi składającemu się na plan miasta (np. pojedynczy budynek, ulica, chodnik). Byłaby to jednak bardzo duża ilość danych. Wyszukiwanie oraz zwracanie informacji o mieście na tak niskim poziomie mogłoby w znaczny sposób obciążać bazę danych i pogorszyć wydajność systemu. Zdecydowano się więc na rozwiązanie, w którym w polu „plan” trzymany będzie jedynie adres URL do pliku z planem miasta.

Tabela „Mapy hałasu”

Tabela mapy hałasu zawiera informacje o dostępnych mapach hałasu. Zamieszczono w niej również szereg dodatkowych informacji takich, jak: przedział czasu, dla którego mapa została wykonana, obszar miasta objęty jej zasięgiem, opis. Pole miasto umożliwia stworzenie relacji z tabelą miasta. Wynika to z faktu, iż dla jednego miasta może być dostępnych wiele różnych map hałasu, wyznaczonych np. dla

różnych przedziałów czasowych. Dodano dodatkowe pole opis, można w nim zamieścić komentarz dotyczący sporządzonej mapy hałasu. Podobnie, jak w przypadku tabeli miasta, tak i w tym przypadku w rekordzie przechowywana jest jedynie informacja o katalogu, w którym umieszczono kompletny zbiór materiałów stanowiących mapę hałasu.

Tabela „Parametry psychoakustyczne”

Tabela ta zawiera nowe wskaźniki szkodliwości hałasu. Jak wspomniano wyżej, ich definicje i dokładny opis zamieszczono w rozdziale 7.5. Odzwierciedlają one nowy sposób opisu skutków ekspozycji na hałas. Opisana wyżej stacja pomiarowa umożliwia wyznaczanie tych wskaźników w czasie rzeczywistym.

5.6. Sposoby wizualizacji wyników

Upowszechnienie informacji o wynikach pomiarów zrealizowano w formie wyspecjalizowanego serwisu internetowego. Został on opracowany z myślą o dalszej rozbudowie. Struktura serwisu (podobnie jak całego systemu) ma charakter modułowy i obejmuje szereg połączonych ze sobą odrębnych elementów funkcjonalnych. Dla wszystkich użytkowników dostępne są:

- serwis informacyjny, zawierający różnorodne informacje o hałasie, jego wpływie na zdrowie człowieka,
- rozbudowany moduł prezentacji wyników pomiarów,
- moduł ankiet subiektywnych wraz z prezentacją wyników,
- dostępne mapy hałasu,
- informacje o parametrach hałasu zmierzonych przez poszczególne stacje pomiarowe,
- baza wybranych dźwięków hałasów.

Moduł prezentacji wyników oddzielono od modułu akwizycji danych oraz od logiki obsługi bazy danych. Dzięki czemu można w prosty sposób rozbudowywać serwis o dodatkowe funkcje. Serwis WWW, odpowiadający za prezentację i przetwarzanie danych pobranych przez serwer, został zrealizowany z wykorzystaniem języka PHP (*PHP Hypertext Preprocessor*).

W trakcie opracowywania jest system publicznej prezentacji wyników w postaci serwisu internetowego, prezentującego wyniki w czasie rzeczywistym. W przypadku

instalowania stacji do pomiaru hałasu (z funkcją pomiaru uciążliwości) w sąsiedztwie hałaśliwego zakładu pracy, można na bieżąco informować kierownictwo o aktualnym poziomie dźwięku (np. za pomocą SMS). W ten sposób osoby odpowiedzialne będą mogły wpływać na dostosowanie poziomu emisji akustycznej do pory dnia i dopuszczalnego poziomu uciążliwości.

W opracowanym systemie zaimplementowano szereg różnych sposobów prezentowania zgromadzonych w bazie danych wyników pomiarów. Poniżej wymieniono rodzaje danych dostępne w systemie, należą do nich:

- karta rzeczywistego punktu pomiarowego,
- zestawienie dostępnych punktów pomiarowych dla danego obszaru,
- mapa rozkładu poziomu hałasu,
- wyniki pomiarów subiektywnych w oparciu o ankiety elektroniczne,
- ranking dźwięków uciążliwych

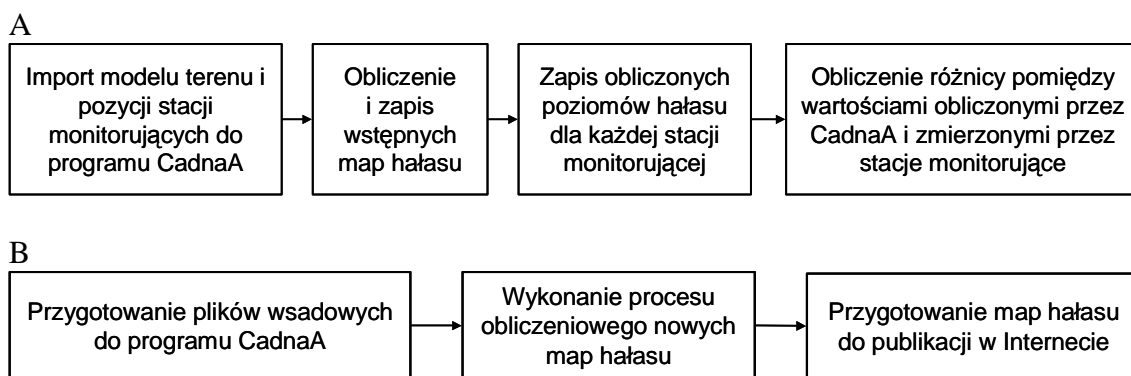
Dla każdego z rodzajów danych został opracowany dedykowany sposób ich prezentacji. Serwis internetowy stworzony został w ten sposób, aby spełnić podstawowe normy ergonomiczne serwisu WWW. Posiada on szereg udogodnień, które pozwalają użytkownikowi w łatwy sposób nawigowanie po poszczególnych stronach serwisu oraz bezkolizyjne interpretowanie wybranych pól we wszechobecnych formularzach. Serwis internetowy i jego poszczególne moduły zostały przygotowane w taki sposób, aby korzystanie z nich przez dowolnego użytkownika było proste i intuicyjne. W miejscach, w których jest to potrzebne, znajdują się obszernie opisy akcji związanej z danym elementem serwisu, a także różnego rodzaju piktogramy, które w sposób wizualny usprawniają nawigację po zawartości serwisu internetowego.

Prezentacja dynamicznych map hałasu

W celu prezentacji dynamicznych map hałasu stworzono aplikację dedykowaną do szybkiego tworzenia map hałasu, wykorzystującą moduły obliczeniowe opracowane w ramach projektów europejskich [159]. Uwzględniono zarówno modelowanie propagacji dźwięku w przestrzeni otwartej, jak również modele źródeł hałasu. Źródła hałasu drogowego i szynowego są weryfikowane za pomocą rzeczywistych pomiarów hałasu dokonywanych w wybranych punktach pomiarowych za pomocą opisanych wyżej stacji monitorujących. Aplikacja obsługuje również różne formaty danych GIS [188]. Jest odpowiednio dostosowana do prezentowania danych w Internecie. Równolegle stworzono mechanizmy tworzenia dynamicznych map hałasu w oparciu o

oprogramowanie CadnaA. Jest to referencyjne środowisko do modelowania propagacji hałasu.

Na rys. 5.6 przedstawiono schematycznie proces tworzenia dynamicznej mapy hałasu z wykorzystaniem oprogramowania CadnaA. Część A dotyczy obliczeń wstępnych, realizowanych w oparciu o dane o źródłach hałasu, numeryczny model terenu i rzeczywiste dane pomiarowe. Część B odnosi się do obliczeń końcowych oraz przygotowania wyników do opublikowania mapy wynikowej na stronie Internetowej. Dokładny opis procedury tworzenia dynamicznej mapy hałasu został zawarty w raporcie badawczym Katedry Systemów Multimedialnych, opracowany przez grupę studentów [63]. Koordynatorem tych prac był autor niniejszej rozprawy doktorskiej.



Rys. 5.6. Schemat procesu tworzenia dynamicznej mapy hałasu za pomocą oprogramowania CadnaA

W systemie, oprócz wyników pomiarów obiektywnych, dostępne są również ankiety, za pomocą których badane są subiektywne odczucia uciążliwości różnych źródeł hałasu. Możliwa jest również wielostronna prezentacja wyników tych badań.

Zaprezentowany, prototypowy system znajduje się obecnie w fazie intensywnych testów. Ponadto, rozwijany jest system obliczania rozkładu poziomów hałasu z uwzględnieniem nieliniowego rozmieszczenia punktów analizy, aby uzyskać wiarygodny rozkład konturów hałasu o jednakowych poziomach [102]. Przygotowany jest do wdrożenia w badaniach pilotażowych na obszarze aglomeracji miejskiej na mocy porozumienia w tej sprawie zawartego pomiędzy Politechniką Gdańską i Gminą Miasta Gdańsk.

Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze informacje na temat opracowanego Multimedialnego Systemu Monitorowania Hałasu. Stanowi on platformę teleinformatyczną do praktycznego uruchomienia opracowanych w niniejszej rozprawie metod oceny szkodliwości hałasu.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań wpływu hałasu na słuch w wybranych rodzajach aktywności, uzyskane za pomocą zaprezentowanych narzędzi i metod. Zebrano w nim wyniki pomiarów hałasu, wykonanych m.in. za pomocą przedstawionej w niniejszym rozdziale stacji monitorowania hałasu oraz równoległe wyniki badań słuchu.

6. BADANIA WPŁYWU HAŁASU NA STAN SŁUCHU W WYBRANYCH OBSZARACH AKTYWNOŚCI

W niniejszym rozdziale przedstawiono przeprowadzone badania wpływu hałasu na słuch. Badania zostały przeprowadzone w trzech różnych płaszczyznach. Należą do nich: badania hałasu, badania słuchu oraz badania ankietowe. W pierwszej kolejności przedstawiono metodykę prowadzonych badań, miejsca wykonanych pomiarów, organizację czasową badań słuchu oraz uzyskane wyniki wraz z ich analizą. Prace prowadzono z udziałem osób w wieku szkolnym oraz w grupie studentów.

Wyróżniono następujące obszary aktywności: szkoła, wybrane kluby studenckie, próba zespołu muzycznego, słuchanie muzyki za pomocą odtwarzacza mp3. Analiza danych dostępnych w literaturze potwierdza zasadność doboru wymienionych rodzajów ekspozycji i związanymi z nimi zagrożeniami dla słuchu. Dotyczy to zarówno przypadku hałasu w klubach podczas prób zespołów muzycznych, jak i osobistych odtwarzaczy dźwięku [17][56][65][87][89][90][100][170][176] oraz klimatu akustycznego panującego w szkołach [106][107][182]. Badania hałasu w tych obszarach aktywności miały na celu wskazanie, jaki jest wpływ hałasu na słuch osób uczestniczących w danym rodzaju aktywności.

Zagrożenie hałasem zawodowym i jego negatywny wpływ na słuch, występującym na różnorodnych stanowiskach pracy jest faktem bezdyskusyjnym i szeroko udokumentowanym [8][22][32][84][131][148][163][181][186][195]. W niniejszej rozprawie skoncentrowano się na młodszej grupie wiekowej (dzieci i młodzież w wieku szkolnym) oraz osobach dorosłych (studenci). Główną motywacją do przeprowadzenia prezentowanych dokładnych badań stopnia zagrożenia hałasem wśród dzieci i młodzieży były uzyskane wyniki testów przesiewowych słuchu prowadzonych na szeroką skalę w licznych szkołach na terenie całego kraju [183]. Uzyskane dane, prezentowane w dalszej części niniejszego rozdziału, wskazują na powszechne występowanie różnorodnych zaburzeń w funkcjonowaniu narządu słuchu wśród dzieci, młodzieży szkolnej i studenckiej.

6.1. Metodologia prowadzonych badań

Zaproponowane podejście do problemu badania zagrożenia hałasem wynikało m.in. z potrzeby sprawdzenia czy opracowane systemy multimedialne mogą być wykorzystywane do kompleksowej oceny hałasu i jego oddziaływania na słuch.

Przeprowadzone badania polegały na wykonaniu pomiarów słuchu bezpośrednio przed i po ekspozycji na hałas oraz dokładnej analizie parametrów klimatu akustycznego towarzyszącego danej ekspozycji. Każdorazowo celem badań było określenie skutków słuchowych powstałych w następstwie danej ekspozycji. W badaniach wykorzystano analizatory hałasu oraz szereg metod do pomiaru słuchu, do których należą: przesiewowe badanie słuchu za pomocą systemu „Słyszę...”, audiometria tonalna wykonana dla wybranych częstotliwości oraz badanie sygnału otoemisji akustycznej wywołanej produktami zniekształceń nieliniowych ślimaka (DPOAE). Poniżej zamieszczono dokładny opis metodyki badań słuchu odpowiadającej każdej z wymienionych metod.

6.1.1. Pomiary hałasu

Badania hałasu były prowadzone z wykorzystaniem opracowanego w KSM systemu MSMH oraz miernika hałasu firmy B&K typ 2260. Miernik poziomu dźwięku B&K 2260 był wykorzystywany do pomiaru hałasu w warunkach laboratoryjnych (badanie odtwarzaczy mp3 oraz pomiar poziomu hałasu podczas ekspozycji w kontrolowanych warunkach akustycznych). W przypadku pomiaru hałasu wytwarzanego przez przenośne odtwarzacze dźwięku zastosowano sztuczne ucho B&K typ 4152. Przed każdą sesją pomiarową wykorzystywany system pomiarowy był kalibrowany za pomocą kalibratora B&K typ 4231. Wymienione oprzyrządowanie znajduje się w posiadaniu Katedry Systemów Multimedialnych.

Przeprowadzono następujące pomiary hałasu: analiza szerokopasmowa, poziomy L_{AFmin} , L_{Aeq} , L_{AFmax} , histogram poziomów L_{AF} , rozkład skumulowany poziomów L_{AF} , dodatkowo w wybranych przypadkach poziom L_{Cpk} ; analiza w pasmach tercjowych, poziomy L_{AFmin} , L_{Aeq} , L_{AFmax} . Mikrofon pomiarowy w każdym przypadku był umieszczony w miejscu, gdzie typowo znajdowało się najwięcej osób narażonych na hałas. Pomiarów dokonywano zgodnie z normą PN-N-01307 [155]. Na tej podstawie przyjęto założenie, że zmierzony poziom hałasu odzwierciedlał rzeczywisty poziom hałasu, na który narażone były osoby biorące udział w badaniach słuchu. W tabeli 6.1 zestawiono informację o rodzaju miernika poziomu dźwięku zastosowanego w zależności od rodzaju ekspozycji. Miało to na celu weryfikację działania opracowanego, teleinformatycznego systemu pomiarowego w warunkach terenowych (szkoły, kluby, próby). Miało to kluczowe znaczenie do udowodnienia słuszności tezy pierwszej, postawionej w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Tabela 6.1. Zastosowany system pomiarowy w zależności od rodzaju ekspozycji

Rodzaj ekspozycji	Szkoły	Kluby	Próby	Odtwarzacze	Laboratorium
MSMH	X	X	X	-	-
B&K 2260	-	-	-	X	X

6.1.2. Pomiary słuchu

Jak wspomniano w rozdziale 4, system „Słyszę...” został wykorzystany w badaniach pilotażowych. Został on stworzony do przeprowadzania badań przesiewowych słuchu. Negatywny wynik testu przesiewowego oznacza konieczność przeprowadzenia dokładniejszych badań za pomocą klasycznych metod diagnostycznych. Uzyskane wyniki badań przesiewowych, przeprowadzone w wybranych klubach i szkołach przez autora niniejszej rozprawy wskazywały na występowanie istotnych skutków słuchowych (ekspozycja w klubach). Zaistniała zatem konieczność przeprowadzenia dokładnych badań słuchu, które pozwalają na precyzyjne określenie rozmiaru skutków słuchowych. W tym celu zastosowano badanie słuchu za pomocą audiometrii tonalnej (badanie subiektywne) oraz metody z wykorzystaniem otoemisji akustycznych produktów zniekształceń nieliniowych ślimaka DPOAE (badanie obiektywne). Uzyskane wyniki pomiarów zostały wykorzystane do opracowania nowej metody określania skutków słuchowych wywołanych ekspozycją na hałas. W tabeli 6.2 podano liczbę osób biorących udział w badaniach słuchu w poszczególnych miejscach narażeń z uwzględnieniem zastosowanej metody.

Tabela 6.2. Zastosowany system pomiarowy w zależności od rodzaju ekspozycji wraz z podaniem liczby osób przebadanych daną metodą

Metoda badania	Szkoły	Kluby	Próby	Odtwarzacze	Laboratorium
System „Słyszę...”	Badania pilotażowe		-	-	-
DPOAE	20	41	9	8	-
Audiometria tonalna	-	40	9	8	49

Pomiary słuchu metodą audiometrii tonalnej

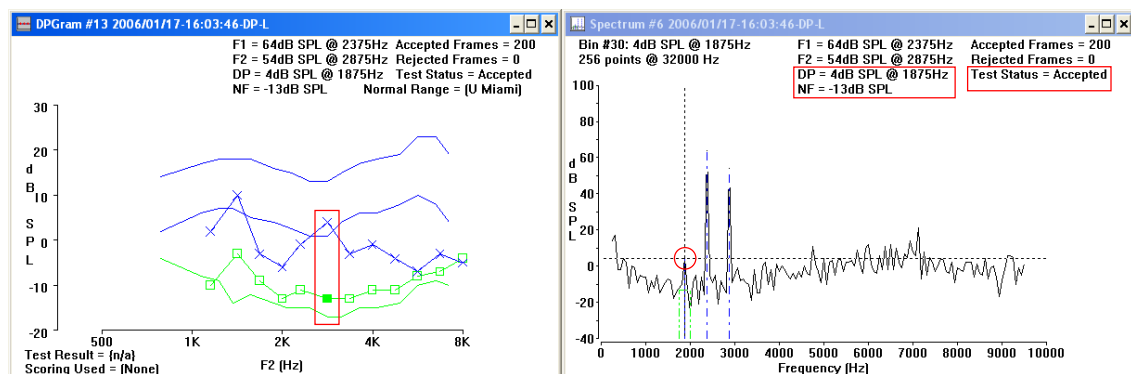
Do badania słuchu metodą audiometrii tonalnej zastosowano audiometr: Midimate 622 firmy MADSEN. Badania przeprowadzono zgodnie z procedurą audiometrii tonalnej dla częstotliwości od 1 do 8 kHz. Zastosowano wstępującą metodę podawania bodźca dźwiękowego. Takie podejście wynika z faktu, iż po ekspozycji na hałas osoby badane bardzo często uskarżały się na dolegliwości związane z odczuwaniem szumów i

pisków w uszach. Obecność tego wrażenia mogłaby prowadzić do mylenia sygnału testowego z wrażeniem szumu usznego.

Przedstawiony dobór mierzonych parametrów wynika z faktu, iż wpływ hałasu na słuch jest najlepiej widoczny w zakresie średnich i wysokich częstotliwości [141]. Badania słuchu przeprowadzono w zaadaptowanych do tego celu pomieszczeniach, tak dobranych, aby uniezależnić się od dźwięków zewnętrznych, mogących zakłócać wykonywanie pomiarów słuchu.

Pomiar słuchu metodą DPOAE

Pomiary słuchu metodą DPOAE przeprowadzono za pomocą systemu GSI 60 DPOAE. Parametry pobudzenia były następujące: L_1 65 dB SPL, L_2 55 dB SPL, $f_2/f_1 = 1,2$, częstotliwości (średnia geometryczna): 1062, 1312, 1562, 1812, 2187, 2625, 3062, 3687, 4375, 5187, 6187, 7375. Dla każdego sygnału testowego rejestrowano poziom odpowiedzi ślimaka oraz poziom szumu tła. Na rysunku 6.1 przedstawiono pojedynczy wynik badania metodą DPOAE. Zaznaczono istotne parametry, które miały znaczenie przy klasyfikowaniu wyniku testu. Odpowiedź uznawano za poprawną, jeśli poziom sygnału otoemisji akustycznej był większy od szumu tła o nie mniej niż 10 dB. Jest to widoczne na rys. 6.1. Czerwona ramka na rys. po lewej stronie przedstawia wybrany wynik pomiaru odpowiedzi ślimaka. Dla tego pomiaru różnica pomiędzy poziomem odpowiedzi ślimaka a szumem jest bardzo duża i wynosi 17 dB. Na rysunku z prawej strony przedstawiono szczegółowy wykres odpowiedzi ślimaka (czerwone koło) oraz widmo sygnału pobudzającego (dwa wyraźne piki w widmie). Czerwone ramki na prawym zdjęciu oznaczają uzyskany wyniku testu. Dodatkowo analizowano jeszcze czas trwania sygnału DP, który musiał trwać nie mniej niż 200 kolejno analizowanych ramek sygnału analizowanego przez oprogramowanie diagnostyczne.

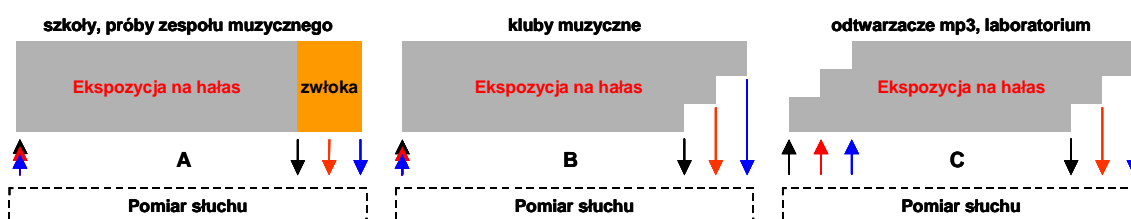


Rys. 6.1. Przykładowy wynik badania słuchu metodą DPOAE

Podobnie, jak w przypadku pomiarów metodą audiometrii tonalnej, tak i w przypadku metody DPOAE zadbano, aby pomiary były wykonywane w odpowiednich warunkach akustycznych. Jedynie w przypadku badań słuchu przeprowadzonych w szkołach odnotowano przypadki zakłócenia niektórych pomiarów przez dźwięki dobiegające z sąsiednich pomieszczeń.

6.1.3. Organizacja czasowa przeprowadzonych pomiarów słuchu

Przeprowadzenie badań słuchu dla różnych rodzajów aktywności wymagało zastosowania różnych scenariuszy postępowania. Jest to podyktowane specyfiką danej aktywności oraz ograniczonymi środkami technicznymi użytymi do przeprowadzenia badań. Wyróżniono trzy, różne pod względem organizacyjnym, schematy postępowania, przedstawione na rysunku 6.2. Rysunek oznaczony literą A obejmuje badania słuchu wykonane w szkołach oraz podczas prób zespołu muzycznego. Jest to rodzaj aktywności, w którym wynik badania wpływu hałasu na słuch był obarczony największym błędem. Każdorazowo, bezpośrednio przed ekspozycją badano słuch wybranym osobom. Następnie osoby te były poddane ekspozycji na hałas (np. w przypadku szkół – przerwa pomiędzy kolejnymi lekcjami). Niezwłocznie po zakończeniu ekspozycji te same osoby poddano ponownie badaniom słuchu. Ze względu na czas trwania badania, pojawia się zwłoka czasowa, polegająca na tym, że bezpośrednio po ekspozycji na hałas słuch można zbadać tylko jednej osobie. Kolejne badanie jest już opóźnione w stosunku do końca ekspozycji o czas badania słuchu. Z tych powodów przed przerwą możliwe było przebadanie zaledwie kilku osób.



Rys. 6.2. Organizacja czasowa badania słuchu w szkołach i podczas prób zespołu muzycznego

Badania słuchu w przypadku ekspozycji na hałas w klubach oraz w następstwie korzystania z przenośnych odtwarzaczy dźwięku i warunkach laboratoryjnych nie powodowały powstawania opóźnień pomiędzy ekspozycją a momentem wykonania pomiaru słuchu. W przypadku klubów (rysunek B) osoby były wzywane na badanie w chwili, gdy możliwe było jego przeprowadzenie. W warunkach laboratoryjnych i dla przenośnych odtwarzaczy dźwięku (rysunek C), przebieg badania był tak

zorganizowany, by nie dopuścić do powstania opóźnień oraz by czas ekspozycji dla wszystkich osób był jednakowy.

6.1.4. Badania ankietowe

W celu poznania upodobań i opinii związanych z ekspozycją na hałas w szkołach i klubach opracowano dwie ankiety. Pierwsza, przeznaczona dla uczniów w wieku szkolnym, została przygotowana pod kątem badania subiektywnego odczucia klimatu akustycznego w szkole, miejscu zamieszkania oraz preferencji słuchowych uczniów rozpatrywanych szkół. Druga ankietą została opracowana do badania preferencji związanych z przebywaniem w klubach studenckich oraz korzystania z przenośnych odtwarzaczy dźwięku. Treść wspomnianych ankiet została zamieszczona w załączniku 2.

6.2. Analizowane obszary aktywności

Szkoły

Badania przeprowadzono w trzech, różnych pod względem wieku uczniów, szkołach na terenie Trójmiasta. Należą do nich: szkoła podstawowa (Sopot), gimnazjum i liceum (Gdańsk).

Szkoła podstawowa mieściła się na terenie niezbyt głośnym, oddzielonym od hałaśliwych ulic. Spośród wybranych do pomiarów szkół jest szkołą najmniejszą pod względem liczby uczniów. Korytarze szkolne są dość wąskie, więc podczas przerw jest na nich dość tłoczno. Odczucie panującego w szkole hałasu ze względu na wiek dzieci, było zgodne z przewidywaniami i okazało się największe spośród wszystkich szkół. Głównym źródłem hałasu w tym rodzaju szkół jest głośnie zachowanie dzieci (nie występują dodatkowe źródła dźwięku, jak np. radiowęzeł).

Gimnazjum było położone również na terenie zacisznym, z dala od głównej ulicy Gdańska, w otoczeniu zieleni, stąd nie występują tam dodatkowe, zewnętrzne źródła hałasu. Szkoła jest większa od szkoły podstawowej, uczy się tam o około 15% więcej uczniów, korytarze są bardziej przestronne. Hałas na przerwach dość znacznie podwyższa muzyka nadawana przez szkolny radiowęzeł.

Liceum położone było bliżej ruchliwej ulicy, jednak nie znajduje się w bezpośrednim jej sąsiedztwie. Jest to szkoła największa, zarówno ze względu na wielkość budynku, jak i liczbę uczniów. W szkole działa radiowęzeł, jednak pomiary wykonywane były w dniu, w którym odbywały się matury próbne, dlatego system

nagłośnieniowy nie był włączony. Nie były to warunki typowe dla szkoły, na korytarzach znajdowało się mniej uczniów niż zazwyczaj.

We wszystkich szkołach pomiar wykonywany był w miejscu, w którym przebywa najwięcej uczniów. Wybrano również godziny poranne i południowe, gdyż wtedy w szkołach jest najwięcej osób. Tłó akustyczne występujące na zewnątrz budynku nie miało wpływu na poziom hałasu występującego w poszczególnych szkołach w trakcie trwania pomiarów.

Kluby

Pomiary wykonano w trzech różnych klubach studenckich za uprzednią pisemną zgodą właścicieli (kluby 1 i 2 dotyczą dwóch różnych ekspozycji, mających miejsce w tym samym klubie, lecz z udziałem innych osób i w innych warunkach akustycznych). Rozpatrywane kluby różniły się rodzajem odtwarzanej muzyki. W klubach 1, 2, 4 dominowała popularna muzyka taneczna, zaś w trzecim klubie odtwarzano muzykę rockową i metalową.

Kluby muzyczne były w ten sposób wytypowane, aby możliwe było szybkie przejście do odpowiednio przygotowanego pomieszczenia, w którym badano słuch. Czas pomiędzy opuszczeniem klubu a pomiarem słuchu wynosił około 2 minut.

Próby zespołu muzycznego

Wykonano również serię pomiarów podczas prób zespołu muzycznego. W skład zespołu wchodził: perkusista, basista oraz osoba grająca na instrumencie klawiszowym. Zespół wykonywał muzykę jazzową. Próby odbywały się w niewielkim pomieszczeniu na poddaszu. Na części ścian znajdowały się kotary, których zadaniem było zmniejszenie czasu pogłosu i wyeliminowanie części odbić. Czas trwania poszczególnych prób był różny. Próba pierwsza trwała 50, a druga 68 minut. Czas trwania typowej próby to około 90 minut.

Przenośne odtwarzacze dźwięku

W badaniu wykorzystano 4 rodzaje przenośnych odtwarzaczy dźwięku: CD/MP3-CD Philips EXP3461/00, Sony DE351, MP3 Player IFP-990 iRiver, MP3 PLAYER T30-512MB. Każda osoba dysponowała własnym odtwarzaczem wraz z materiałem dźwiękowym wyposażonym w słuchawki douszne. Badanie hałasu przeprowadzono z wykorzystaniem sztucznego ucha.

Warunki laboratoryjne

Badanie wpływu hałasu na słuch w warunkach laboratoryjnych zostało przeprowadzone z udziałem osób w wieku 21-22 lat (studenci). Jego celem było zbadanie szybkości i poziomu zmian progu słyszenia (efekt TTS), wywołanego hałasem. Przed każdą serią pomiarów kontrolowano poziom hałasu w pomieszczeniu odsłuchowym za pomocą analizatora hałasu Brüel&Kjær typ 2260. Poziom hałasu ustawiano na 88 dBA. Dodatkowo, podczas każdej ekspozycji kontrolowano poziom hałasu bezpośrednio przy małżowinie usznej słuchacza przez czas 30 sekund. Sygnałem hałasu był szum biały, ograniczony pasmowo w zakresie częstotliwości $1 \div 6$ kHz. W tabeli 6.3 przedstawiono poziomy równoważne w poszczególnych pasmach widma tercjowego.

Tabela 6.3. Poziomy hałasu dla poszczególnych częstotliwości widma tercjowego

f [Hz]	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
L_{Aeq} [dB]	67,3	71,8	74,6	77,9	77,8	79,8	81,5	81,9	78,9

Studenci byli poddawani ekspozycji na hałas trzykrotnie. Pojedyncza ekspozycja trwała 10 minut. Bezpośrednio po niej wykonywano badanie słuchu metodą audiometrii tonalnej dla częstotliwości 4 kHz z rozdzielczością 1 dB. Częstotliwość 4 kHz została dobrana ze względu na fakt, iż w tym rejonie spodziewano się wyraźnego przesunięcia progu słyszenia. Jest to związane również z charakterem widmowym zastosowanego sygnału testowego. Rozdzielczość pomiaru w audiometrycznych wynosząca 1 dB wynikała z chęci uchwycenia nawet niewielkich zmian w progu słyszenia u poszczególnych osób. Wzorowano się w tym przypadku na podobnych pomiarach, przeprowadzonych przez innych badaczy [85]. Przed rozpoczęciem ekspozycji na hałas każdej osobie zbadano słuchu. Po zakończeniu fazy ekspozycji wykonywano badania słuchu w odstępach 8 minutowych, aż do momentu powrotu słuchu do stanu sprzed ekspozycji. Pomiar słuchu dla pojedynczej osoby trwał około 2 minut.

Dla uniknięcia ryzyka związanego z opóźnieniami w pomiarze słuchu wykonywanym dla kolejnych osób, wprowadzono opóźnienie dla kolejnych osób rozpoczynających ekspozycję na hałas. Każda kolejna osoba rozpoczynała ekspozycję na hałas w 2 minuty później. Na rysunku poniżej przedstawiono schematycznie przebieg badania. Okazało się, że krytyczną sprawą, decydującą o powodzeniu

eksperymentu w warunkach laboratoryjnych, jest właściwe odmierzenie czasu ekspozycji.

Faza ekspozycji

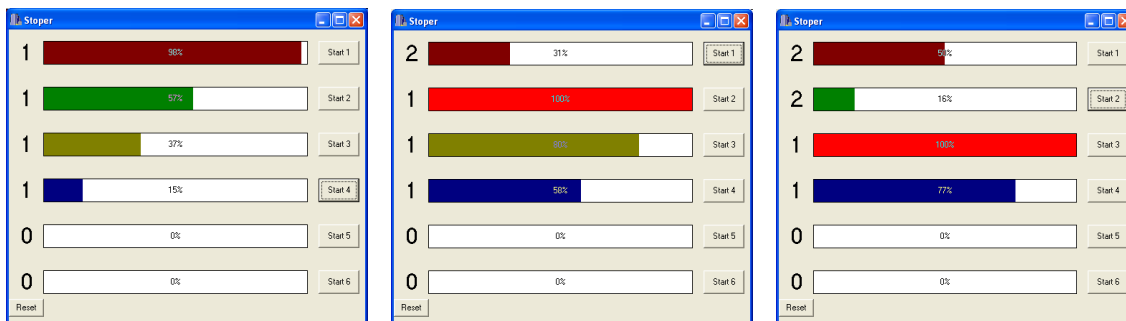


Faza odpoczynku



PS – pomiar słuchu (2 minuty), **FEH** – faza ekspozycji na hałas (10 minut), **FO** – faza odpoczynku (8 minut)

Do sprawnego odmierzenia czasu ekspozycji opracowano dedykowany program komputerowy, który w formie graficznej prezentuje czas, jaki pozostał do końca ekspozycji. Dodatkowo przedstawia również liczbę ekspozycji, co dodatkowo ułatwiało określenie czasu przebywania w hałasie. Na rys. 6.3 przedstawiono przykładowe wskazania stopera. Gdy pasek postępu zmienił kolor na czerwony, dana osoba udawała się na pomiar słuchu.



Rys. 6.3. Przykładowe okna stopera odmierzającego czas ekspozycji

6.3. Wyniki pomiarów hałasu

W tabeli 6.4 zestawiono uzyskane wyniki pomiarów hałasu wykonane w różnych miejscach narażeń. Symbolem p1, p2, p3 oznaczono pomiary hałasu podczas kolejnych przerw pomiędzy lekcjami w szkołach. Jak wcześniej określono, rozpatrywano takie rodzaje aktywności, jak: szkoła (hałas podczas przerwy), kluby studenckie, próby zespołu muzycznego, korzystanie z przenośnych odtwarzaczy dźwięku. Dodatkowo zamieszczono parametry statystyczne L_{90} i L_{10} obliczone w oparciu o rozkłady skumulowane poziomu dźwięku. Pełen zestaw wykresów, przedstawiających

histogramy i rozkłady skumulowane poziomów hałasu uzyskane dla poszczególnych pomiarów zostały zamieszczone w załączniku 3. Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że najwyższe poziomy hałasu wyrażone równoważnym poziomem dźwięku korygowanym krzywą A odnotowano w przypadku prób zespołu muzycznego oraz klubów muzycznych. Znacznie mniejszy był hałas występujący w szkole podstawowej i towarzyszący słuchaniu muzyki za pomocą przenośnych odtwarzaczy dźwięku przy ustawieniu skali odsłuchu w 2/3 dostępnego zakresu. Relatywnie najniższe poziomy hałasu odnotowano w przypadku gimnazjum i liceum oraz przy korzystaniu z przenośnych odtwarzaczy dźwięku przy ustawieniu skali odsłuchu w 1/2 dostępnego zakresu.

Tabela 6.4. Zbiorcze wyniki pomiarów hałasu wykonane w różnych miejscach narażeń. Wartości poziomów dźwięku podano w dBA, poziom odniesienia wynosił $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, czas ekspozycji jest wyrażony w minutach

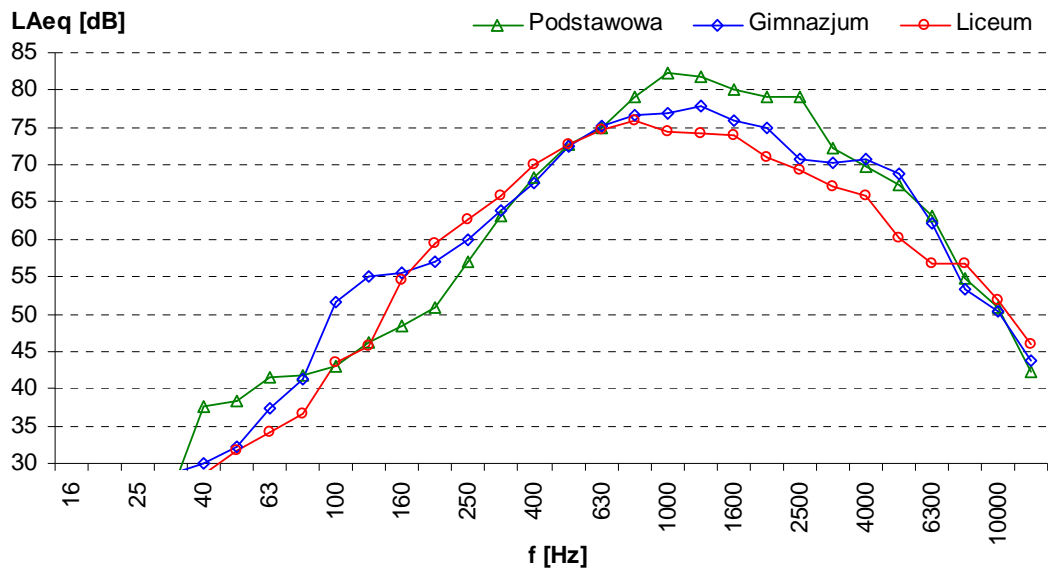
Rodzaj Ekspozycji	L_{AFmin}	L_{Aeq}	L_{AFmax}	L_{90}	L_{10}	Czas ekspozycji
Szkoła podst. p1	64,5	86,9	102,1	82,1	90,8	10
Szkoła podst. p2	67,4	89	105,5	84,1	92,8	10
Szkoła podst. p3	74,5	86,1	111,3	80,7	89,1	20
Gimnazjum p1	67,2	85,5	106,8	81,7	88,6	15
Gimnazjum p2	69,5	84,3	103,1	80,1	87,9	15
Liceum p1	56,5	79,1	93,4	74,6	82,6	10
Liceum p2	72,0	83,6	97,4	80,5	87,0	10
Próba 1	39,9	99,6	111,6	84,2	105,1	50
Próba 2	52,5	100,5	114,4	78,4	105,9	68
Klub 1	76,2	95,3	108,2	91,0	98,5	75
Klub 2	78,0	96,8	112,2	88,9	100,4	90
Klub 3	68,9	99,0	114,2	93,5	102,6	91
Klub 4	70,6	95,5	110,8	85,4	99,4	89
Osoba 1, mp3 1/2	48,0	77,7	87,3	71,1	81,0	30
Osoba 2, mp3 1/2	41,7	82,5	90,6	75,2	85,2	30
Osoba 3, mp3 1/2	---	82,1	95,3	61,5	86,7	30
Osoba 4, mp3 1/2	---	87,3	99,9	77,5	90,6	30
Osoba 1, mp3 2/3	55,8	87,5	96,6	80,9	90,8	30
Osoba 2, mp3 2/3	45,4	88,0	102,0	80,0	91,3	30
Osoba 3, mp3 2/3	---	90,1	103,3	68,3	94,7	30
Osoba 4, mp3 2/3	---	92,1	104,6	82,5	95,4	30

Szkoły

Pomiary hałasu wykonano w trzech różnych szkołach. Różniły się one między sobą wiekiem uczniów. Do szkoły podstawowej (szkoła 1) uczęszczały najmłodsze dzieci, w gimnazjum (szkoła 2) młodzież w wieku 12 – 15 lat, zaś w liceum (szkoła 3) młodzież w wieku 15 – 19 lat. Największy hałas panował w szkole 1. Wynika to z faktu, iż głównym źródłem hałasu w szkołach są dzieci. W tej grupie wiekowej zachowują się one niezwykle dynamicznie, co pociąga za sobą wysoki poziom hałasu. W szkole 2 podstawowym źródłem hałasu obok samych uczniów był działający radiowęzeł. W szkole 3 poziom hałasu wynikał z gwaru i głośnych rozmów prowadzonych podczas przerwy przez uczniów. Dodatkowo, dla szkoły podstawowej uzyskano największą dynamikę zmian poziomów hałasu, co ma swoje odzwierciedlenie w szerokości krzywej rozkładu skumulowanego. Dla gimnazjum i liceum stwierdzono znaczne podobieństwo w kształcie krzywej rozkładu skumulowanego. Dla gimnazjum krzywa rozkładu skumulowanego jest najbardziej stroma. Wskazuje to na dużą koncentrację poziomów hałasu w okolicy jednego poziomu dźwięku. Ten fakt wynika z charakteru głównego źródła hałasu, jakim był w tym przypadku radiowęzeł. W przypadku liceum stromość krzywej rozkładu skumulowanego jest nieco mniejsza niż ma to miejsce dla gimnazjum. Głównym źródłem hałasu były głośne rozmowy uczniów. Klimat akustyczny w rozpatrywanych szkołach był bardzo zróżnicowany. Uzyskane wartości poziomu równoważnego wskazują, że największy hałas panował w szkole podstawowej (najwyższa wartość poziomu równoważnego wynosiła 89 dBA). Nieco niższe poziomy hałasu odnotowano w gimnazjum (poziom równoważny na poziomie 85 dBA). Rozmieszczone na ścianach głośniki emitowały sygnał akustyczny na znacznym poziomie. Dodatkowym elementem potęgującym ogólny hałas są długie, pozbawione elementów tłumiących korytarze. Najniższe poziomy zarejestrowano w liceum (83,6 dBA). W ogólności różnica w zmierzonych poziomach równoważnych hałasu dla rozpatrywanych szkół wynosi 10 dB pomiędzy najgłośniejszą przerwą w szkole podstawowej a najcichszą przerwą w liceum.

Na rys. 6.4 przedstawiono wybrane charakterystyki widm hałasu w pasmach tercjowych dla poszczególnych szkół. Uzyskane widma hałasów są w ogólności dość zbliżone. Nieznaczne różnice widoczne są w zakresie niskich częstotliwości. Dla szkoły podstawowej i gimnazjum występują w tym zakresie poziomy o około 10 dB większe w stosunku do charakterystyki uzyskanej w pomiarach w liceum. Uzyskane wykresy

wskazują na jeszcze jedną różnicę w charakterze hałasu pomiędzy szkołą podstawową a gimnazjum i liceum. Jest nią znacznie wyższy poziom hałasu w zakresie częstotliwości środkowych.



Rys. 6.4. Przykładowe poziomy równoważne hałasu w pasmach tercyjnych uzyskane w rozpatrywanych szkołach

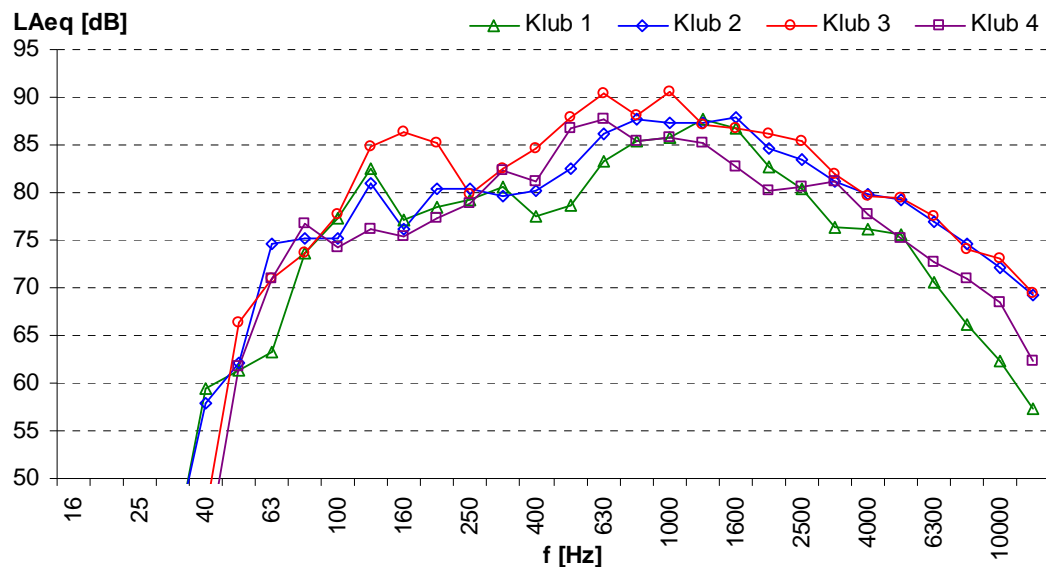
Kluby

Udział w różnorodnych zespołach muzycznych oraz przebywanie w klubach studenckich jest częstą rozrywką wśród młodzieży. Z tego powodu przeprowadzono badania hałasu i słuchu właśnie w takich miejscach. Dla każdego z miejsc stwierdzono występowanie bardzo dużych poziomów dźwięku. Długotrwałe i częste przebywanie w hałasie o tak wysokim poziomie może prowadzić do trwałego uszkodzenia słuchu.

Czas trwania pomiarów hałasu był dla klubów 2-4 zbliżony i wynosił 90 minut. W klubie pierwszym pomiar trwał 75 minut. Uzyskane wartości poziomu równoważnego hałasu w klubach 1, 2, 4 są zbliżone. W klubie 3 uzyskano najwyższą wartość poziomu hałasu. Wyznaczone wartości poziomów statystycznych L_{90} i L_{10} jednoznacznie wskazują, że w klubie 3 dominowały najwyższe poziomy hałasu przez cały czas trwania pomiaru. W klubie 4 zaobserwowano największą dynamikę zmian poziomu hałasu. W klubie 1 zakres zmian poziomów hałasu był najmniejszy.

Wyraźnie widoczne przesunięcie krzywej dla klubu 3 w stronę wyższych poziomów hałasu. Dla klubu 4 kształt krzywej skumulowanej obejmuje najszerszy zakres poziomów hałasu. Krzywa dla klubu 1 posiada najbardziej strome zbocze. Świadczy to o małej zmienności poziomów hałasu podczas obserwacji. Rysunek 6.5

przedstawia uzyskane charakterystyki widma tercjowego hałasu dla poszczególnych klubów. Dla klubu 2 i 3 zaobserwowano najwyższe poziomy hałasu w zakresie średnich i wysokich częstotliwości. Dla klubu 1 uzyskano względnie najniższe poziomy w zakresie wysokich częstotliwości.



Rys. 6.5. Poziomy równoważny hałasu w pasmach tercjowych uzyskane w rozpatrywanych klubach

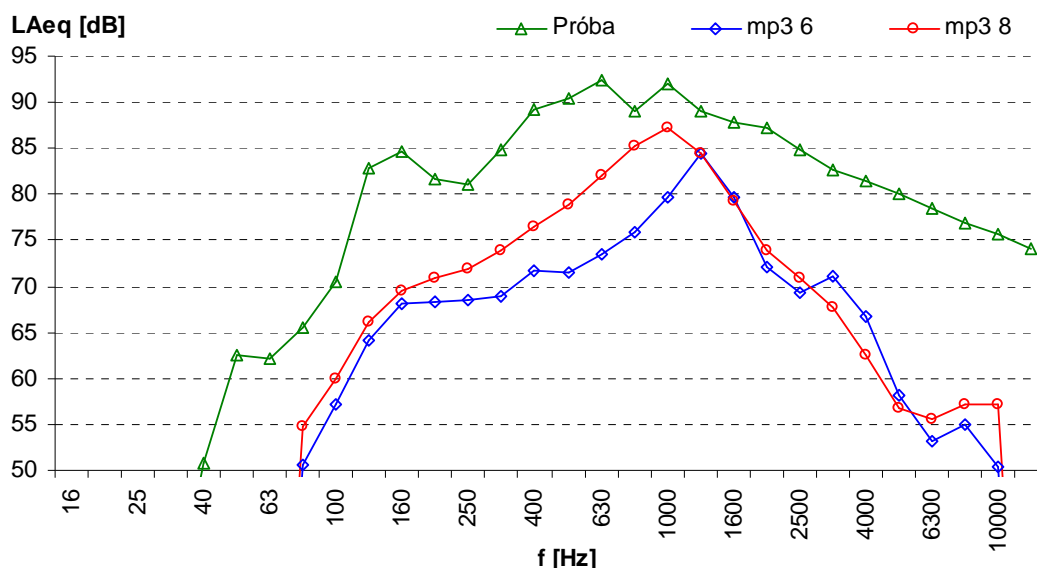
Próby zespołu muzycznego i przenośne odtwarzacze dźwięku

Pomiary wykonano podczas prób wybranego studenckiego zespołu muzycznego. W skład zespołu wchodził: perkusista, basista oraz osoba grająca na instrumencie klawiszowym. Dla tego pomiaru zaobserwowano dużą dynamikę poziomów hałasu. Wynika to ze specyfiki gry zespołu. Muzycy często przerywali grę i konsultowali się ze sobą. W tabeli zamieszczono również wyniki analizy dozymetrycznej dla zmierzonych czasów ekspozycji.

Udział w różnorodnych zespołach muzycznych czy słuchanie muzyki z wykorzystaniem odtwarzaczy mp3 jest częstą rozrywką wśród młodzieży akademickiej. Z tego powodu przeprowadzone badania hałasu i słuchu dotyczyły takiej właśnie aktywności. Dla każdego z miejsc stwierdzono występowanie bardzo dużych poziomów dźwięku. Długotrwałe i częste przebywanie w hałasie o tak wysokim poziomie może prowadzić do trwałego uszkodzenia słuchu.

Na rys. 6.6 przedstawiono wybrane rozkłady poziomów hałasu w pasmach tercjowych dla ekspozycji podczas próby zespołu muzycznego oraz dla odtwarzaczy mp3. Poziom hałasu podczas próby zespołu był zdecydowanie wyższy w porównaniu

do poziomów hałasu wytwarzanych przez odtwarzacze mp3 dla ½ skali. Odnotowane poziomy równoważne dźwięku dla ekspozycji (mp3 ½ skali) mieściły się w zakresie 77,7 – 82,5 dB. W jednym przypadku poziom równoważy wynosił 87,3 dB. Dominujące poziomy hałasu występowały dla zakresu częstotliwości od 400 do około 3000 Hz.



Rys. 6.6. Przykładowe poziomy równoważne hałasu w pasmach tercjowych uzyskane podczas próby zespołu muzycznego i wybranych przenośnych odtwarzaczy dźwięku

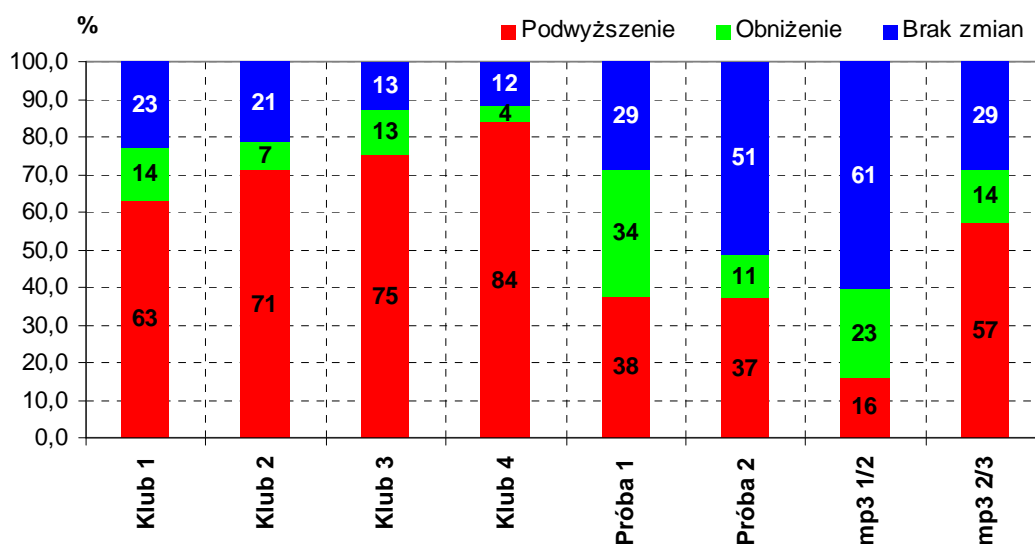
Warunki laboratoryjne

Badanie w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono na grupie studentów liczącej 49 osób. Przebadano łącznie 98 uszu. Wykonano łącznie 290 pojedynczych pomiarów hałasu (pomiar dla każdej ekspozycji niezależnie). Średni, równoważny poziom hałasu dla wykonanych pomiarów wynosił 88 dBA przy odchyleniu standardowym równym 0,9 dB. Wykonano dokładną analizę uzyskanych wyników. Aby możliwe było właściwe porównanie otrzymanych charakterystyk dla poszczególnych uszu, przeprowadzono normalizację względem maksymalnego przesunięcia progu słyszenia dla każdego z uszu niezależnie. Umożliwiło to bezpośrednie zestawienie i porównanie otrzymanych uników.

6.4. Wyniki pomiarów słuchu metodą audiometrii tonalnej

Badania słuchu metodą audiometrii tonalnej zostały przeprowadzone zgodnie z wcześniej przedstawioną metodologią. Przeprowadzono dwa rodzaje analiz. Pierwszy dotyczył zbadania sposobu zmian progu słyszenia w następstwie ekspozycji na hałas. Przy czym istotny był sam kierunek zmiany, nie zaś jego poziom. Drugi rodzaj analizy

dotyczył właśnie uzyskania odpowiedzi o poziomie zmian progu słyszenia. Analiza sposobu zmiany progu słyszenia została przeanalizowana na dwóch poziomach szczegółowości. Pierwszy obejmował przeprowadzenie zbiorczej analizy uzyskanych wyników niezależnie dla rozpatrywanych rodzajów aktywności. Uzyskane wyniki przeanalizowano pod kątem zmiany progu słyszenia po ekspozycji na hałas w odniesieniu do progu słyszenia uzyskanego bezpośrednio przed przebywaniem w hałasie. Wyróżniono trzy możliwe przypadki: podwyższenie progu słyszenia (zmniejszenie czułości słuchu), obniżenie progu słyszenia (zwiększenie czułości słuchu), brak zmiany, dla wszystkich rozpatrywanych częstotliwości audiometrycznych łącznie. Uzyskane w ten sposób dane znormalizowano względem całkowitej liczby wyników dla danej ekspozycji. Wartości te, wyrażone w procentach ilustrują skalę zmiany progu słyszenia w następstwie ekspozycji na dany rodzaj hałasu. Na wykresie z rys. 6.7 przedstawiono uzyskane zbiorcze wyniki omawianej analizy.



Rys. 6.7. Zbiorcza analiza wyniki pomiarów słuchu metodą audiometrii tonalnej dla rozpatrywanych rodzajów aktywności

Do podwyższenia progu słyszenia u badanych osób dochodziło najczęściej podczas ekspozycji w klubach studenckich. Dla ekspozycji podczas prób zespołu muzycznego uzyskano zbliżone wartości określające zmiany w zakresie obniżenia progu słyszenia. Jednak dla drugiej ekspozycji przeważającym efektem było obniżenie progu słyszenia, podobnie jak podczas ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3 przy 1/2 skali. W tym przypadku poziom hałasu był na tyle niski, że mogło wystąpić zjawisko stymulacji narządu słuchu. W przypadku odtwarzaczy mp3 uzyskane wyniki uległy radykalnej zmianie po zwiększeniu głośności na 2/3 skali.

Kluby

Uzyskane wyniki pomiarów hałasu metodą audiometrii tonalnej zestawiono w tabeli 6.5. Dane zawarte w tabeli przedstawiają wyniki analizy danych pomiarowych ukierunkowanej na zbadanie poziomu zmian progu słyszenia dla poszczególnych częstotliwości audiometrycznych. Obliczono wartości minimalne, średnie, maksymalne oraz odchylenie standardowe od wartości średniej. Podobnie, jak w przypadku analizy dotyczącej sposobu zmiany progu słyszenia, tak i w tym przypadku analizowane dane uzyskano na podstawie różnicy zmierzonych progów słyszenia sprzed i po ekspozycji na hałas.

Tabela 6.5. Wyniki pomiarów słuchu metodą audiometrii tonalnej dla poszczególnych klubów

	f [Hz]	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Klub 1	Min	-10	-5	0	-5	-5	-15	-5
	Avg	0,5	4,75	7,25	10,5	11	5,25	2,25
	Max	15	15	20	25	30	20	15
	σ	6,9	6,4	6,2	8,4	9,8	10,3	6,2
Klub 2	Min	0	---	-5	0	-5	-5	-20
	Avg	5,3	---	8,1	9,4	13,1	7,5	1,4
	Max	15	---	20	20	30	25	25
	σ	5,3	---	6,4	6,6	7,9	9,1	10,8
Klub 3	Min	-5	-10	-5	0	-5	-5	-25
	Avg	3,6	7,3	10,2	12,3	15,7	12,5	-0,5
	Max	20	20	20	25	25	40	20
	σ	6,9	7,0	6,1	6,6	8,5	10,1	11,6
Klub 4	Min	0	0	-5	0	0	-5	-15
	Avg	4,4	7,5	8,9	9,4	13,9	12,5	5,6
	Max	15	20	20	20	25	30	20
	σ	4,2	5,2	5,3	5,1	7,0	9,9	8,0

Najwyższe wartości przesunięcia progu słyszenia uzyskano dla ekspozycji w klubie 3. Najmniejsze zmiany wystąpiły podczas ekspozycji w klubie 1. Największe, średnie zmiany progu słyszenia występowały dla częstotliwości 4 kHz dla wszystkich ekspozycji. Wskazane powyżej wartości wyróżniono w tabeli za pomocą pogrubionej czcionki. Należy zwrócić uwagę na duży rozrzut zmian progu słyszenia w następstwie ekspozycji na hałas, o czym świadczą wartości parametrów min, max oraz odchylenia

standardowego. Świadczy to o dużym zróżnicowaniu indywidualnej wrażliwości na hałas osób biorących udział w badaniach. W pojedynczych przypadkach obserwowano zmianę progu słyszenia o 30÷40 dB dla 4 i 6 kHz (wartości wyróżnione kolorem czerwonym).

W tabeli 6.6 przedstawiono wyniki statystycznej analizy zmiany progu słyszenia dla poszczególnych klubów. Każdy pomiar był rozpatrywany niezależnie. Porównywano uzyskaną wartość pomiędzy badaniem przed i po ekspozycji na hałas. Ten rodzaj analizy wyników polegał na niezależnym przedstawieniu uzyskanych zmian progu słyszenia w następstwie ekspozycji na hałas dla rozpatrywanych częstotliwości audiometrycznych. Wynik ujemny oznacza podwyższenie progu słyszenia (zmniejszona czułość słuchu), wynik dodatni – obniżenie progu słyszenia (zwiększona czułość słuchu). Dopełnieniem do 100% jest wynik określający brak zmiany. Na wykresie udział tego wyniku nie został przedstawiony ze względu na chęć pokazania kierunku zmian progu słyszenia. Należy podkreślić, że w tym rodzaju analizy skoncentrowano się jedynie na fakcie zmiany progu słyszenia dla poszczególnych częstotliwości. Nie był brany pod uwagę poziom tej zmiany. Wartości bezwzględne zostały znormalizowane względem całkowitej liczby wyników uzyskanych dla danego klubu i danej częstotliwości. Dokładny opis przeprowadzonych obliczeń podano w załączniku 4.

Tabela 6.6. Zbiorcze wyniki zmian progu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji. Pomiar metodą audiometrii tonalnej

Zmiana	Klub	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Obniżenie progu	Klub 1	25,0	15,0	0,0	5,0	10,0	25,0	20,0
	Klub 2	0,0	---	5,6	0,0	5,6	11,1	22,2
	Klub 3	25,0	8,3	4,2	0,0	8,3	4,2	37,5
	Klub 4	0,0	0,0	5,6	0,0	0,0	5,6	16,7
Podwyższenie progu	Klub 1	40,0	60,0	75,0	85,0	85,0	60,0	35,0
	Klub 2	61,1	---	83,3	77,8	94,4	66,7	44,4
	Klub 3	54,2	75,0	87,5	95,8	87,5	79,2	45,8
	Klub 4	66,7	88,9	94,4	83,3	94,4	88,9	72,2
Bez zmian	Klub 1	35,0	25,0	25,0	10,0	5,0	15,0	45,0
	Klub 2	38,9	---	11,1	22,2	0,0	22,2	33,3
	Klub 3	20,8	16,7	8,3	4,2	4,2	16,7	16,7
	Klub 4	33,3	11,1	0,0	16,7	5,6	5,6	11,1

Analizując otrzymane wyniki, należy podkreślić, że najwięcej przypadków podwyższenia progu słyszenia zaobserwowano wśród osób ekspozowanych na hałas w klubie 4. Dla tej ekspozycji najliczniejsze niekorzystne zmiany wystąpiły dla częstotliwości: 1, 1,5, 2, 4, 6 i 8 kHz. Dla częstotliwości od 1,5 do 6 kHz zmiany te mieszczą się w zakresie 83 – 94%. Oznacza to, że zdecydowana większość osób doznała podwyższenia progu słyszenia w tym zakresie częstotliwości. Przyczyną tego stanu rzeczy może być charakter czasowy klimatu akustycznego w tym klubie. Dokładnych danych dostarcza analiza histogramu i rozkładu skumulowanego poziomów dźwięku, zarejestrowana dla tego klubu (Rys. 13 w załączniku 3). Wyraźnie widoczny jest podział struktury histogramu poziomów hałasu na dwa zakresy, reprezentowane przez uformowane maksima. Jest to związane z tym, że w pierwszej części ekspozycji, pod nieobecność prowadzącego dyskotekę, odtwarzano muzykę jedynie przez nagłośnienie ogólnie dostępne w klubie. W drugiej części ekspozycji pojawił się personel obsługujący główne nagłośnienie. Zostało ono uruchomione, co spowodowało skokowy wzrost poziomu dźwięku panującego w klubie. Wysoki poziom hałasu utrzymywał się do końca ekspozycji. Drugim pod względem liczby niekorzystnych zmian progu słyszenia był klub 3. W tym przypadku wysoki odsetek podwyższenia progu słyszenia, w zakresie od 79 do 96% odnotowano dla częstotliwości: 2, 3, 4, 6 kHz. Relatywnie najmniej zmian negatywnych zaobserwowano dla ekspozycji w klubie 1.

Próby zespołu muzycznego i przenośne odtwarzacze dźwięku

W tabeli 6.7 zestawiono wyniki poziomu zmian progu słyszenia dla ekspozycji na hałas podczas prób zespołu muzycznego oraz wywołane przez słuchanie muzyki za pomocą odtwarzaczy mp3. Jak wcześniej wspomniano, dla odtwarzaczy mp3 przeprowadzono ekspozycję dla dwóch ustawień głośności: $\frac{1}{2}$ i $\frac{2}{3}$ głośności dostępnej skali danego urządzenia. Uzyskane wyniki nie są już tak jednoznaczne, jak to miało miejsce w przypadku ekspozycji na hałas w klubach. Pomimo wysokiego poziomu równoważnego hałasu, odnotowanego podczas prób (100 dBA, czas trwania ekspozycji wynosił: dla pierwszej próby 50, a dla drugiej 68 minut), uśrednione poziomy przesunięcia progu słyszenia należy uznać za nieznaczne. Największa wartość średniego przesunięcia progu słyszenia wystąpiła dla częstotliwości 4 kHz i wynosiła 4,4 dB (wartość wytluszczone w tab. 6.7). Maksymalny poziom przesunięcia progu słyszenia, odnotowany podczas ekspozycji dla prób wynosił 15 dB dla częstotliwości 3 kHz i 20

dB dla częstotliwości 8 kHz. Nie są to jednak poziomy przesunięcia adekwatne do zmierzonej wartości poziomu hałasu. Odpowiedzią na tę wątpliwość może być sposób przeprowadzenia badań słuchu. W tym przypadku wystąpiła zwłoka czasowa pomiędzy zakończeniem ekspozycji na hałas a momentem pomiaru słuchu (dokładny opis zamieszczono w podrozdziale 6.1.5). Konsekwencją powstałego opóźnienia może być fałszywie niższy próg słyszenia spowodowany regeneracją słuchu podczas oczekiwania na pomiar. Drugim, istotnym faktem, mogącym tłumaczyć otrzymane wyniki pomiarów słuchu jest struktura czasowa sygnału hałasu, dobrze zobrazowana w formie histogramu i rozkładu skumulowanego (Rys. 8 i 9 w załączniku 3). Dla tego rodzaju ekspozycji wystąpiła bardzo duża dynamika zmian poziomu hałasu. Różnica pomiędzy poziomami statystycznymi L_{90} i L_{10} dla pierwszej próby wynosiła: 20,9 dB, a dla próby drugiej aż 27,5 dB. Oznacza to, że podczas trwania ekspozycji występowały fazy bardzo wysokiego poziomu hałasu przeplatane z fragmentami względnej ciszy. Ta nieregularność w poziomie hałasu stwarzała możliwość do częściowej regeneracji słuchu już w trakcie ekspozycji.

Tabela 6.7. Wyniki pomiarów słuchu metodą audiometrii tonalnej dla prób i odtwarzaczy mp3

	f [Hz]	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Próba 1	Min	-10	-5	-5	-5	-5	-10	-10
	Avg	0,6	-2,5	0,6	1,9	4,4	0	0
	Max	10	5	10	15	10	10	15
	σ	6,2	3,8	5,6	6,5	5,0	6,5	7,6
Próba 2	Min	-5	-5	0	0	-5	-5	-10
	Avg	2	1	2,5	1	1,5	4,5	1,5
	Max	10	10	10	10	10	10	20
	σ	4,2	3,9	3,5	3,2	5,8	4,4	7,8
mp3 1/2	Min	-5	-5	-5	-5	-5	-10	-5
	Avg	0	-0,6	-0,6	0	-0,6	-0,6	1,9
	Max	5	5	10	5	0	5	15
	σ	2,7	3,2	5,0	3,8	1,8	5,0	7,0
mp3 2/3	Min	0	-5	-5	-5	-5	-10	-5
	Avg	6,9	1,3	3,1	5	3,1	7,5	0
	Max	15	10	10	10	15	35	5
	σ	4,6	4,4	4,6	4,6	5,9	13,6	3,8

Interesujące wyniki uzyskano dla ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3 przy ustawieniu głośności na ½ dostępnej skali. Okazuje się, że średnia zmiana progu słyszenia dla częstotliwości 1,5, 2, 4, 6 kHz wskazuje na jego obniżenie. Nieznaczne podwyższenie progu słyszenia odnotowano jedynie dla częstotliwości 8 kHz. Wynika z tego, że ten rodzaj ekspozycji okazał się dla niektórych słuchaczy stymulujący, i zaowocował zwiększeniem czułości słuchu. Ten fakt nie odbiega od intuicyjnych oczekiwań, ze względu na charakter sygnału pobudzającego (dokładną charakterystykę przedstawiono w podrozdziale 6.3.4). Istotna zmiana w przesunięciu progu słyszenia miała miejsce po zwiększeniu poziomu głośności do 2/3 dostępnej skali. W tym przypadku nie obserwowano już tak częstego obniżenia progu słyszenia.

Jak widać z tab. 6.7, największe średnie przesunięcie wystąpiło dla częstotliwości 6 kHz i wyniosło 7,5 dB. W jednym przypadku odnotowano przesunięcie dla tej częstotliwości wynoszące aż 35 dB. Analiza typu zmiany progu słyszenia wskazuje na duże zróżnicowanie w zależności od rodzaju ekspozycji. W tabeli 6.8 przedstawiono zbiorcze wyniki zmian progu słyszenia. Analizy dokonano zgodnie z wcześniej omówioną metodologią. Najczęściej do podwyższenia progu słyszenia dochodziło po ekspozycji na hałas za pomocą odtwarzaczy mp3 przy ustawieniu głośności na 2/3 skali.

Tabela 6.8. Zbiorcze wyniki zmian progu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji. Pomiar metodą audiometrii tonalnej

Zmiana	Typ	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Obniżenie progu	Próba 1	25,0	62,5	37,5	25,0	12,5	37,5	37,5
	Próba 2	10,0	10,0	0,0	0,0	30,0	10,0	20,0
	mp3 1/2	12,5	25,0	37,5	25,0	12,5	25,0	25,0
	mp3 2/3	0,0	12,5	12,5	12,5	12,5	25,0	25,0
Podwyższenie progu	Próba 1	37,5	12,5	37,5	37,5	75,0	37,5	25,0
	Próba 2	40,0	20,0	40,0	10,0	40,0	80,0	30,0
	mp3 1/2	12,5	12,5	12,5	25,0	0,0	25,0	25,0
	mp3 2/3	87,5	25,0	62,5	87,5	50,0	62,5	25,0
Bez zmian	Próba 1	37,5	25,0	25,0	37,5	12,5	25,0	37,5
	Próba 2	50,0	70,0	60,0	90,0	30,0	10,0	50,0
	mp3 1/2	75,0	62,5	50,0	50,0	87,5	50,0	50,0
	mp3 2/3	12,5	62,5	25,0	0,0	37,5	12,5	50,0

Radykalna zmiana efektu wywołanego przez ten rodzaj ekspozycji ukazuje skalę ryzyka związaną z tego typu aktywnością. Należy jednak podkreślić, że ten rodzaj

ekspozycji dla głośności w 1/2 skali daje zasadniczo odmienne wyniki. W tym przypadku dominuje brak zmiany progu lub jego nieznaczne obniżenie. Podobne wnioski można wysnuć na podstawie wyników uzyskanych dla prób zespołu muzycznego. W tym przypadku również występuje bardzo duży rozrzut uzyskanych wyników.

Całkowity udział liczby wyników słuchu wykazujących podwyższenie progu słyszenia dla obu prób jest zbliżony (37,5% dla próby 1 i 37,1% dla próby 2). Znaczej zmianie uległ procent wskazujący na brak zmiany oraz obniżenie progu słyszenia. Zasadniczej zmianie uległa również struktura zmian progu słyszenia dla poszczególnych częstotliwości audiometrycznych. Dla pierwszej próby najczęściej do podwyższenia progu słyszenia dochodziło na częstotliwości 4 kHz. Dla drugiej próby efekt ten wystąpił w przypadku częstotliwości 6 kHz. Ponadto, dla drugiej próby zdecydowanie rzadziej obserwowano obniżenie progu słyszenia. Taki rozkład wyników może być związany czasem trwania ekspozycji na hałas. W przypadku pierwszej próby ekspozycja była ona krótsza o 18 minut w stosunku do drugiej. Widmo tercjowe poziomów równoważnych hałasu zarejestrowane dla próby 2 charakteryzuje się wyższymi poziomami w zakresie średnich i wysokich częstotliwości (w zakresie 3 – 12 kHz różnice zawierają się w przedziale: $1,6 \div 2,6$ dB).

Warunki laboratoryjne

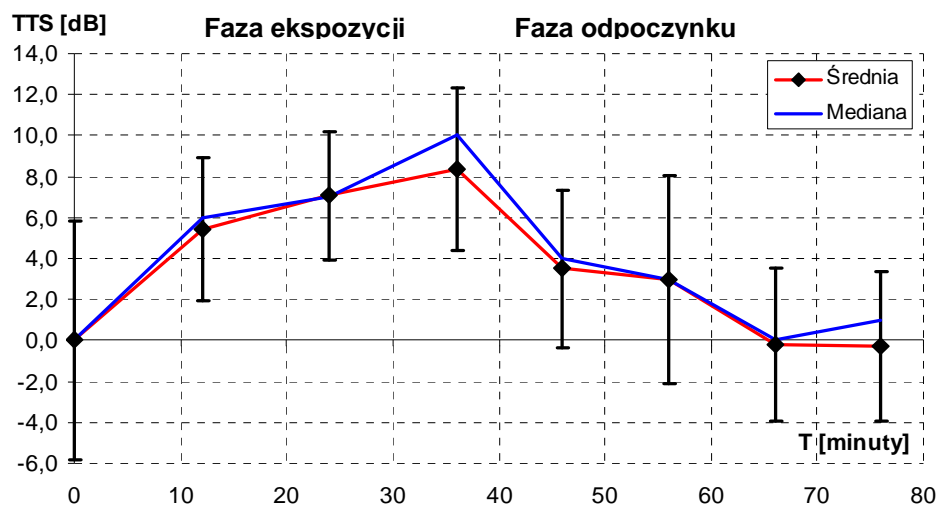
Pomiary słuchu w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono dla częstotliwości 4 kHz z rozdzielczością 1 dB. Dane zestawione w tabeli 6.9 przedstawiono również w formie wykresu z rys. 6.8. Wyraźnie widoczny jest logarytmiczny charakter zmiany średniego progu słyszenia w funkcji czasu trwania ekspozycji. Ten sam charakter występuje zarówno dla fazy ekspozycji, jak i odpoczynku.

Do wyznaczenia przesunięcia progu słyszenia dla uzyskanych wyników pomiarów audiometrycznych zastosowano również medianę (wartość środkową). Uzyskane w ten sposób wyniki są zgodne z wartością średnią. Największa różnica wystąpiła jedynie dla wyników uzyskanych po ostatniej fazie ekspozycji. Obliczone wartości odchylenia standardowego wskazują na znaczny rozrzut wyników. Parametr ten przyjmuje największą wartość dla fazy początkowej i po drugiej fazie odpoczynku, odpowiednio: 5,9 i 5,1 dB. Wartość dla fazy początkowej wynika z osobniczo zróżnicowanego, spoczynkowego progu słyszenia osób biorących udział w badaniach słuchu. Większy rozrzut oraz mniejszy spadek wartości TTS, niż to wynika z przyjętego modelu, zaobserwowano dla drugiej fazy odpoczynku. Ten fakt może mieć związek z

mechanizmami powrotu progu słyszenia do stanu początkowego oraz samym procesem powstawania i zaniku efektu TTS. U części badanych osób mógł pojawić się czynnik strukturalny, opóźniający powrót przesunięcia progu słyszenia do stanu początkowego. Dokładny opis tego mechanizmu zamieszczono w rozdziale 7.1.7. W tabeli 6.9 zestawiono zbiorcze wyniki wykonanych pomiarów słuchu. Wszystkie wartości są wyrażone w dB.

Tabela 6.9. Zbiorcze wyniki zmian progu słyszenia wywołane ekspozycją na hałas (oznaczenia poszczególnych faz: FEH, FO jak na stronie 81)

Czas	TTS min	TTS średni	TTS max	Odchyl. Std. σ	Mediana
Start	-11,8	0,0	10,2	5,9	0,0
FEH 1	-4,8	5,4	10,2	3,5	6,0
FEH 2	-7,8	7,1	10,2	3,2	7,0
FEH 3	-12,8	8,4	10,2	4,0	10,0
FO 1	-11,8	3,5	10,2	3,9	4,0
FO 2	-11,8	3,0	17,2	5,1	3,0
FO 3	-6,8	-0,2	10,2	3,7	0,0
FO 4	-7,8	-0,3	3,2	3,7	1,0



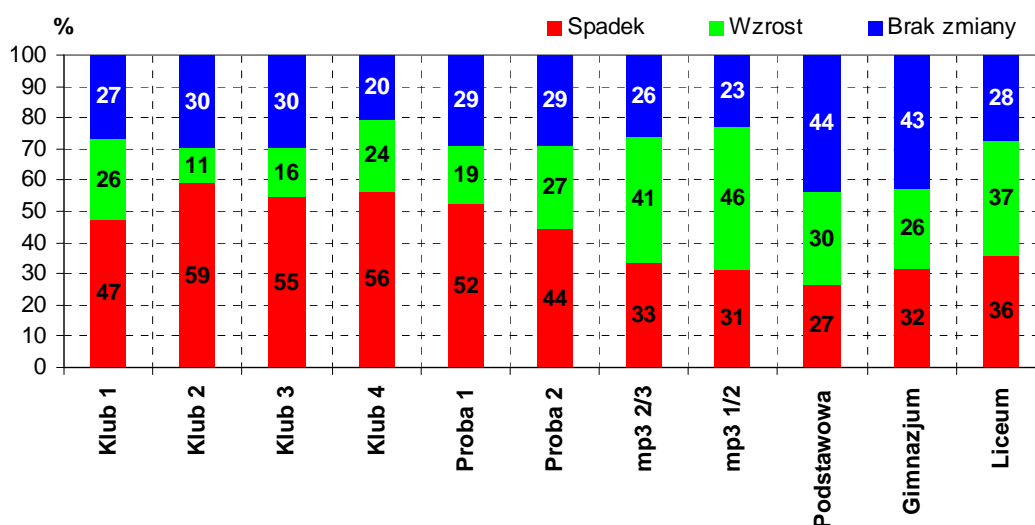
Rys. 6.8. Wyniki badań audiometrycznych uzyskane w warunkach laboratoryjnych

6.5. Wyniki pomiarów słuchu metodą DPOAE

Badania skutków oddziaływania hałasu na słuch dla różnych rodzajów ekspozycji rozszerzono o zastosowanie metody DPOAE. Umożliwia ona określenie aktywności wybranych obszarów ucha wewnętrznego. Ze względu na fakt, iż ekspozycja na wysoki poziom hałasu prowadzi do obniżenia czułości słuchu, to również powinna być

możliwość zaobserwowania zmian w aktywności ślimaka. W badaniu tym obserwowano zatem zmiany poziomu sygnału DP (otoemisji wywołanej produktem zniekształceń nieliniowych ślimaka). Dokładne parametry badania zamieszczono w podrozdziale 6.1.3. Sposób przeprowadzenia zbiorczej analizy uzyskanych wyników opisano w załączniku 5.

Na rysunku 6.9 przedstawiono wyniki zbiorczej analizy pomiarów słuchu metodą DPOAE. Zasadniczo uzyskane wyniki można podzielić na trzy grupy w zależności od dominującego typu zmiany. Pierwsza grupa to ta, w której na skutek ekspozycji na hałas najczęściej dochodziło do zmniejszenia poziomu sygnału DP. Należą do niej aktywności związane z największym poziomem hałasu (kluby i próby). Drugą grupę stanowią ekspozycje, dla których zaobserwowano wzrost sygnału DP. Należą do nich ekspozycje za pomocą odtwarzaczy mp3. Może mieć to związek ze zwiększoną stymulacją ślimaka oraz powodować jego czasową nadaktywność, objawiającą się podwyższonym poziomem sygnału otoemisji. Efekt ten można tłumaczyć tym, że ekspozycja na hałas o średnim poziomie działa stymulująco na ślimak, może jednak świadczyć również o pewnej formie odreagowania komórek słuchowych w następstwie nadmiernej ekspozycji. Ten rodzaj ekspozycji może stanowić jednak ukryte zagrożenie dla słuchu użytkowników. W przeprowadzonych testach, ze względów bezpieczeństwa osób biorących udział w doświadczeniach, nie stosowano poziomów maksymalnych, możliwych do osiągnięcia za pomocą tych urządzeń. Istnieje zatem uzasadniona przesłanka, że przy wyższym poziomie odsłuchu mogą pojawić się skutki, jak obserwowane dla ekspozycji klubach.



Rys. 6.9. Zbiorcza analiza wyniki pomiarów słuchu metodą DPOAE dla rozpatrywanych rodzajów aktywności

Ostatnią grupę stanowią aktywności, dla których nie obserwowano znaczącej zmiany sygnału DP lub też różnica pomiędzy wzrostem a spadkiem poziomu sygnału DP była niewielka. Do grupy tej należą ekspozycje na hałas panujący w szkołach podczas przerw międzylekcyjnych.

Szkoły

Ogółem przebadano 20 uczniów, 10 w szkole podstawowej, 5 w gimnazjum i 5 w liceum (oznaczenia w tabeli 6.10 odpowiednio: – sz.p., gim., lic.). W szkole podstawowej przeprowadzono ogółem 240 pojedyncze pomiary (pomiar dla każdej częstotliwości potraktowano niezależnie). Odnotowano 25 zmian dodatnich i 31 zmian ujemnych, w pozostałych przypadkach nie stwierdzono zmiany. Uśredniając te wyniki względem całkowitej liczby pomiarów uzyskano: 10,4% zmiana dodatnia, 12,9% zmiana ujemna, 76,6% bez zmiany.

W liceum i gimnazjum przebadano po 5 osób, uzyskano zatem po 120 pojedynczych wyników pomiarów. W gimnazjum dodatnia zmiana wyniosła 10%, ujemna 19,2%, nie było zmiany dla 70,8% pomiarów. W liceum wyniki wynosiły odpowiednio: 3,3%, 12,5%, 84,2%. Całościowe, zbiorcze wyniki analiz zmian proggu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji uzyskane metodą DPOAE przedstawiono w tabeli 6.10.

Tabela 6.10. Zbiorcze wyniki zmian proggu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji. Pomiar metodą DPOAE

Zm.	Typ	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Wzrost	sz.p.	10,0	20,0	30,0	5,0	30,0	50,0	50,0	55,0	40,0	40,0	15,0	10,0
	gim.	10,0	20,0	0,0	10,0	40,0	60,0	40,0	40,0	30,0	40,0	10,0	10,0
	lic.	30,0	30,0	30,0	50,0	40,0	30,0	50,0	50,0	50,0	50,0	20,0	10,0
Spadek	sz.p.	10,0	35,0	25,0	35,0	45,0	40,0	35,0	20,0	15,0	25,0	20,0	15,0
	gim.	50,0	60,0	50,0	40,0	50,0	30,0	40,0	20,0	20,0	10,0	0,0	10,0
	lic.	30,0	50,0	40,0	20,0	50,0	40,0	40,0	40,0	50,0	40,0	20,0	10,0
Bez zmian	sz.p.	80,0	45,0	45,0	60,0	25,0	10,0	15,0	25,0	45,0	35,0	65,0	75,0
	gim.	40,0	20,0	50,0	50,0	10,0	10,0	20,0	40,0	50,0	50,0	90,0	80,0
	lic.	40,0	20,0	30,0	30,0	10,0	30,0	10,0	10,0	0,0	10,0	60,0	80,0

Uzyskane charakterystyki odpowiedzi ślimaka nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie, że hałas panujący na przerwie ma negatywny wpływ na słuch badanych osób. Świadczą o tym średnie zmiany poziomu sygnału DP u badanych osób. Wynoszą

one odpowiednio: dla szkoły podstawowej: 30,3% wzrost sygnału DP, 27,5% spadek; dla gimnazjum: 27,5% wzrost, 30,0% spadek; dla liceum: 36,7% wzrost, 34,2% spadek.

Uzyskane różnice w charakterystykach mieszczą się w granicy błędu pomiaru wynikającym między innymi z różnego umieszczenia sondy pomiarowej w przewodzie słuchowym. Należy podkreślić, że do uzyskania wiarygodnych wyników pomiarów tą metodą niezbędne jest przeprowadzenie badań w warunkach akustycznych wymaganych przy pomiarach audiometrycznych. W rozpatrywanych przypadkach najlepsze warunki pomiarów panowały w szkole podstawowej. W przypadku gimnazjum badania słuchu prowadzono w gabinecie dyrektora. W liceum badania przeprowadzono w odrębnej sali, udostępnionej na czas wykonywanych pomiarów. Znajdowała się ona w części budynku dobrze izolowanej od pozostałych pomieszczeń.

Kluby

W tabeli 6.11 przedstawiono wyniki analizy zmiany sygnału DP w zależności od częstotliwości uzyskane dla poszczególnych klubów. Dla ekspozycji we wszystkich klubach zaobserwowano zmniejszenie aktywności ślimaka. Świadczy o tym degradacja sygnału otoemisji akustycznej w następstwie ekspozycji na hałas. Statystycznie najwięcej przypadków zmniejszenia amplitudy sygnału DP stwierdzono dla osób przebywających w klubie 2 i 4.

Tabela 6.11. Zbiorcze wyniki zmian poziomu sygnału otoemisji akustycznej dla poszczególnych ekspozycji. Pomiar metodą DPOAE

Zm.	Klub	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Wzrost	Klub 1	40,9	40,9	31,8	27,3	36,4	31,8	13,6	18,2	31,8	18,2	9,1	9,1
	Klub 2	16,7	16,7	11,1	5,6	0,0	5,6	0,0	0,0	22,2	16,7	22,2	16,7
	Klub 3	33,3	29,2	12,5	29,2	20,8	12,5	12,5	8,3	8,3	8,3	16,7	0,0
	Klub 4	33,3	50,0	27,8	38,9	22,2	33,3	16,7	16,7	16,7	16,7	5,6	5,6
Spadek	Klub 1	27,3	45,5	45,5	54,5	45,5	50,0	77,3	77,3	63,6	54,5	13,6	13,6
	Klub 2	38,9	61,1	77,8	66,7	83,3	88,9	100,0	83,3	55,6	38,9	11,1	5,6
	Klub 3	29,2	50,0	75,0	62,5	62,5	83,3	75,0	75,0	70,8	45,8	12,5	12,5
	Klub 4	50,0	33,3	61,1	44,4	55,6	61,1	77,8	83,3	72,2	72,2	50,0	11,1
Bez zmian	Klub 1	31,8	13,6	22,7	18,2	18,2	18,2	9,1	4,5	4,5	27,3	77,3	77,3
	Klub 2	44,4	22,2	11,1	27,8	16,7	5,6	0,0	16,7	22,2	44,4	66,7	77,8
	Klub 3	37,5	20,8	12,5	8,3	16,7	4,2	12,5	16,7	20,8	45,8	70,8	87,5
	Klub 4	16,7	16,7	11,1	16,7	22,2	5,6	5,6	0,0	11,1	11,1	44,4	83,3

Wyraźnie widoczna jest maksymalna degradacja odpowiedzi ślimaka w zakresie częstotliwości, dla którego obserwowano maksymalne przesunięcie progu słyszenia uzyskane metodą audiometrii tonalnej.

Dla pomiarów słuchu przeprowadzonych po ekspozycji na hałas w klubach uzyskano największe, niekorzystne zmiany czułości słuchu. Wyniki zmian poziomu sygnału otoemisji akustycznych uzyskane dla poszczególnych częstotliwości przedstawiają dokładny rozkład zmian zachodzących w aktywności ślimaka. Najczęściej do zmniejszenia poziomu sygnału DP dochodziło dla zakresu częstotliwości (średnia geometryczna tonów pobudzających) 1562 – 5187 Hz.

Próby zespołu muzycznego i przenośne odtwarzacze dźwięku

Analiza zmian poziomu sygnału DP dla rozpatrywanych częstotliwości wykonana dla ekspozycji podczas prób zespołu muzycznego oraz odtwarzaczy mp3 wskazuje na interesujące procesy zachodzące w uchu wewnętrznym. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 6.12. Na wstępie należy podkreślić, że charakter ekspozycji podczas prób oraz z użyciem odtwarzaczy mp3 różnił się zasadniczo między sobą. Dodatkowo istotne różnice wystąpiły podczas poszczególnych ekspozycji w ramach rozważanych typów (próba / mp3). Zostały one przybliżone w podrozdziale dotyczącym wyników pomiarów hałasu.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono zasadniczą różnicę w charakterze zmian pomiędzy wynikami dla ekspozycji podczas prób, a tymi uzyskanymi dla odtwarzaczy mp3. Dla prób dominującym typem zmiany jest spadek poziomu sygnału DP, choć można również wskazać częstotliwości, dla których dominuje wzrost (1062, 1562 – tylko próba 1, 2187 – tylko próba 2). Dla odtwarzaczy mp3 występuje wyraźnie znaczny rozrzut wyników. Dla serii z ustawieniami głośności na 1/2 skali występują dwa typy zmian. Dla częstotliwości w zakresie 1562 – 2625 dominuje spadek poziomu sygnału DP, zaś dla częstotliwości: 3062 – 5187 najczęściej obserwowano wzrost sygnału DP. Dla ekspozycji o poziomie głośności 2/3 dostępnej skali doszło do zasadniczej zmiany w uzyskanym rozkładzie wyników dla poszczególnych częstotliwości. W zakresie częstotliwości: 1562 – 2187 Hz tym razem dominuje wzrost poziomu sygnału DP (dla tych częstotliwości w przypadku ekspozycji 1/2 skali obserwowano spadek poziomu sygnału DP). Z kolei w zakresie 3062 – 5187 również dominuje wzrost, niemniej jednak względem pomiaru dla głośności dla 1/2 zakresu odnotowano istotny spadek uzyskanej wartości zmian poziomu DP wyrażonej

w %. Również dla tego zakresu częstotliwości zaobserwowano względny wzrost odsetka określającego zmniejszenie sygnału DP.

Tabela 6.12. Zbiornicze wyniki zmian progu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji. Pomiar metodą DPOAE

Zm.	Ekspoz.	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Wzrost	Próba 1	50,0	25,0	50,0	0,0	37,5	12,5	12,5	12,5	0,0	0,0	12,5	12,5
	Próba 2	50,0	40,0	30,0	30,0	60,0	10,0	30,0	20,0	20,0	20,0	10,0	0,0
	mp3 1/2	12,5	37,5	25,0	37,5	0,0	25,0	75,0	100,0	62,5	50,0	37,5	25,0
	mp3 2/3	25,0	25,0	87,5	87,5	62,5	37,5	50,0	62,5	50,0	25,0	25,0	12,5
Spadek	Próba 1	50,0	62,5	37,5	75,0	62,5	75,0	87,5	62,5	62,5	25,0	12,5	12,5
	Próba 2	30,0	40,0	60,0	50,0	40,0	70,0	40,0	70,0	60,0	30,0	20,0	20,0
	mp3 1/2	25,0	37,5	75,0	62,5	75,0	62,5	12,5	0,0	25,0	12,5	0,0	12,5
	mp3 2/3	37,5	75,0	12,5	12,5	25,0	37,5	25,0	37,5	37,5	37,5	12,5	25,0
Bez zmian	Próba 1	0,0	12,5	12,5	25,0	0,0	12,5	0,0	25,0	37,5	75,0	75,0	75,0
	Próba 2	20,0	20,0	10,0	20,0	0,0	20,0	30,0	10,0	20,0	50,0	70,0	80,0
	mp3 1/2	62,5	25,0	0,0	0,0	25,0	12,5	12,5	0,0	12,5	37,5	62,5	62,5
	mp3 2/3	37,5	0,0	0,0	0,0	12,5	25,0	25,0	0,0	12,5	37,5	62,5	62,5

Podsumowując należy stwierdzić, że zwiększenie głośności odsłuchu za pomocą odtwarzaczy mp3 zmieniło w znaczący sposób charakter zmian poziomu sygnału DP. Ponadto, porównując zmiany sygnału DP dla prób i odtwarzaczy mp3, uzyskano różny charakter tych zmian. Dla prób dominuje spadek poziomu DP, zaś dla odtwarzaczy mp3 występuje wzrost poziomu. U podłoża tych różnic może leżeć rozkład poziomów dźwięku dla poszczególnych częstotliwości. Podczas prób w zakresie średnich i wysokich częstotliwości obserwowano wysokie poziomy dźwięku, ponadto dynamika zmian poziomu dźwięku była duża. Dla odtwarzaczy mp3 uzyskane poziomych dźwięku w zakresie średnich i wysokich częstotliwości były zaskakująco niskie (w stosunku do całkowitego poziomu dźwięku A).

6.6. Wyniki badań ankietowych przeprowadzonych w szkołach

Ocena hałasu w miejscu zamieszkania

Ogólnie można stwierdzić, że zdaniem ankietowanych przebywają oni w środowisku głośnym za dnia oraz cichym w nocy. Jako najczęstsze źródło hałasu w miejscu zamieszkania ankietowani wskazali hałas drogowy (38,6%). Na drugim miejscu najczęściej wymieniany był hałas sąsiedzki (34,1%).

Ocena hałasu w szkole

Wyniki badań pokazują zgodność odpowiedzi ankietowanych, dotyczących poziomu hałasu w trakcie trwania przerw. Ponad 62% badanych we wszystkich typach szkół stwierdziło, że na przerwach jest bardzo głośno. Prawie 30% pozostałych uczniów stwierdziło, że na przerwach jest głośno. Jednym z dodatkowych źródeł hałasu w szkole gimnazjalnej i ponadgimnazjalnej jest obecność radiowęzła.

W ocenie hałasu panującego podczas lekcji przeważają opinie, że jest cicho lub umiarkowanie głośno. Największe problemy z hałasem na lekcji mają uczniowie szkoły podstawowej. Ponad 50% z nich uważa, że na lekcji jest głośno lub bardzo głośno. Uczniowie wszystkich typów szkół zdecydowanie obniżyliby poziom hałasu na przerwie (ponad 60% badanych). Część z uczniów (około 20%) dostrzega problem hałasu na lekcjach prowadzonych w klasie. Tylko 14% badanych zmniejszyłoby hałas na lekcji wychowania fizycznego. Blisko 10% badanych nie zmieniłoby niczego.

Ocena hałasu związana z upodobaniami muzycznymi oraz rozrywką

Wśród badanych licealistów aż 60% słucha muzyki głośno lub bardzo głośno, 30% umiarkowanie głośno. Natomiast 60% gimnazjalistów i prawie 60% uczniów szkół podstawowych słucha muzyki umiarkowanie głośno lub cicho. Pokazuje to również pewną tendencję do zmiany upodobań i nawyków wraz z wiekiem, co ma konsekwencje w większym narażeniu na uszkodzenie słuchu wywołane nadmiernym hałasem. Kolejnym elementem, zwiększającym ryzyko uszkodzenia słuchu, jest używanie słuchawek. Wyraźnie widoczna jest tendencja do korzystania z tego rodzaju odsłuchu wraz z wiekiem. Ten stan wynika z dostępności różnorodnych przenośnych odtwarzaczy dźwięku (odtwarzacze mp3).

Zadano też pytania dotyczące czasu przeznaczanego na słuchanie muzyki. Uzyskane wyniki potwierdzają intuicyjne odczucie, że częstość słuchania muzyki oraz czas pojedynczej ekspozycji wzrasta wraz z wiekiem. Jest to podyktowane faktem, że ten rodzaj rozrywki jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych wśród młodzieży.

Kolejnym źródłem narażenia na hałas jest udział w głośnych imprezach i wydarzeniach muzycznych. Również z wiekiem wzrasta odsetek osób korzystających z tego rodzaju formy spędzania czasu. Jest to związane z naturalnym procesem dorastania i chęcią spędzania czasu w gronie rówieśników.

6.7. Analiza dozymetryczna

Uzyskane wartości poziomu równoważnego dźwięku zostały wykorzystane do wyznaczenia dziennej dawki hałasu związanej z hałasem panującym podczas pojedynczej przerwy. Analizę dozymetryczną rozszerzono o estymację dawki hałasu dla czasu odpowiadającego przeciętnej liczbie przerw lekcyjnych w ciągu typowego dnia nauki. Bazując na zmierzonych poziomach równoważnych hałasu, przeprowadzono ponadto standardową analizę dozymetryczną. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 6.13. Dodano również wyniki dla przeprowadzonej ekspozycji w warunkach laboratoryjnych. Dla wszystkich rozpatrywanych klubów uzyskane wartości dawki hałasu znacząco przekraczają dopuszczalną dzienną dawkę hałasu. Należy zauważyć, że czas pomiaru wynosił maksymalnie 90 minut. Przeprowadzono krótką ankietę wśród osób przebywających w klubach studenckich w celu określenia typowego czasu pobytu w klubach. Czas ten wynosił średnio 225 minut. Zakładając, że klimat akustyczny w danym klubie jest taki, jak w trakcie pomiaru, wyznaczono teoretyczne dawki hałasu, na jakie narażone są dane osoby. Są one znacząco wyższe i wielokrotnie przekraczają dopuszczalną dzienną dawkę hałasu (dla klubu 3 nawet ponad 10 razy).

Czas ekspozycji na hałas, na który są narażone osoby jest w rzeczywistości dużo dłuższy. Przeprowadzono badania ankietowe, w którym zadano osobom pytanie, jak długo przebywają w klubie, na próbie, w szkole. Na tej podstawie określono średni czas ekspozycji, charakterystyczny dla danego rodzaju ekspozycji. Czasy te wynoszą odpowiednio: szkoła – 3600 s, klub – 13500 s, próba – 5400 s. Zakładając, że w rozpatrywanych miejscach klimat akustyczny nie zmienia się, można wyznaczyć dawkę hałasu, na jaką narażone są osoby dla określonego czasu ekspozycji. Wynoszą one odpowiednio: dla szkoły maksymalnie **26%**, podczas próby zespołu muzycznego **673%**, w klubie 1 – **506%**, w klubie 2 – **1191%** (wartości wyróżnione kolorem czerwonym w tabeli 6.13).

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów oraz przeprowadzonych analiz stwierdzono, że klimat akustyczny w rozpatrywanych szkołach jest niekorzystny. Przyczyną wysokiego poziomu hałasu są głównie sami uczniowie, w niektórych przypadkach na ogólny poziom hałasu ma wpływ dodatkowa aparatura nagłaśniająca. Na podstawie analizy wyników pomiarów słuchu wykonanych w szkołach nie stwierdzono szkodliwego oddziaływania hałasu na słuch. Wynika to z faktu, iż czas

przebywania uczniów w hałasie jest zbyt krótki, aby wystąpiły widoczne zmiany w aktywności ucha wewnętrznego.

Tabela 6.13. Wyniki standardowej analizy dozymetrycznej dla rozpatrywanych rodzajów ekspozycji. Poziom L_{Aeq} wyrażony w dBA, czas wyrażony w minutach, dawka hałasu w % dopuszczalnej, dziennej ekspozycji. Znaczenie symboli p1, p2, p3 jak w tabeli 6.4.

Rodzaj Ekspozycji	L_{Aeq}	Czas pomiaru	Dzienna dawka	Typowy Czas ekspozycji	Dzienna dawka
Szkoła podst. p1	86,9	10	3,2	50	16,2
Szkoła podst. p2	89,0	10	5,2	50	26,2
Szkoła podst. p3	86,1	20	5,4	50	13,4
Gimnazjum p1	85,5	15	3,5	60	14,0
Gimnazjum p2	84,3	15	2,7	60	10,6
Liceum p1	79,1	10	0,5	60	3,2
Liceum p2	83,6	10	1,5	60	9,0
Próba 1	99,6	50	303,9	90	547,0
Próba 2	100,5	68	508,8	90	673,5
Klub 1	95,3	75	168,8	225	506,4
Klub 2	96,8	90	286,5	225	716,1
Klub 3	99,0	91	481,5	225	1190,6
Klub 4	95,5	89	209,8	225	530,3
Osoba 1, mp3 1/2	77,7	30	1,2	60	2,3
Osoba 2, mp3 1/2	82,5	30	3,5	60	7,0
Osoba 3, mp3 1/2	82,1	30	3,2	60	6,4
Osoba 4, mp3 1/2	87,3	30	10,6	60	21,3
Osoba 1, mp3 2/3	87,5	30	11,1	60	22,3
Osoba 2, mp3 2/3	88,0	30	12,5	60	25,0
Osoba 3, mp3 2/3	90,1	30	20,3	60	40,6
Osoba 4, mp3 2/3	92,1	30	32,2	60	64,5

Hałas wyznaczony podczas prób zespołu muzycznego oraz w klubach studenckich osiąga bardzo wysoki poziom. Badania słuchu potwierdziły jego negatywny wpływ na słuch. Zaobserwowano znaczne przesunięcia progu słyszenia oraz istotne zmiany w aktywności ślimaka (obniżenie poziomu sygnału OE podczas badania DPOAE).

6.8. Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki pomiarów hałasu jednoznacznie wskazują, że klimat akustyczny w rozpatrywanych szkołach jest niekorzystny. Przyczyną tego stanu rzeczy jest głównie zachowanie samych uczniów, którzy swoją aktywnością wytwarzają wysoki poziom hałasu. Aktywność ta zmniejsza się wraz z wiekiem uczniów. U starszych dzieci i młodzieży pojawiają się inne upodobania, w tym zamiłowanie do różnego rodzaju rozrywki, czego przykładem może być obecność radiowęzła w gimnazjum i liceum. Niewłaściwie użyty system nagłaśniający może stać się jednak dodatkowym źródłem uciążliwego hałasu. Na poziom hałasu ma również wpływ akustyka pomieszczeń, w którym przebywają uczniowie. Z przyczyn technicznych wyposażenie korytarzy szkolnych jest najczęściej zredukowane do minimum. Sprzyja to powstawaniu licznych odbić, które dodatkowo potęgują uciążliwość hałasu. Biorąc pod uwagę te fakty oraz wiedzę na temat wpływu hałasu na zdrowie człowieka, należy podkreślić, że hałas panujący w szkołach może być przyczyną dodatkowego zmęczenia i stresu dla osób w nim przebywających. Uwzględniając kryteria oceny ryzyka uszkodzenia słuchu wywołanego hałasem, można stwierdzić, że podczas przerw jest ono duże dla szkoły podstawowej. Dla pozostałych szkół waha się pomiędzy średnim a dużym. Jednak, gdy rozpatrzy się fakt, że przerwy są dość krótkie, a zaraz po nich następuje czas względnej ciszy, w którym słuch ma szansę odpocząć, to należy stwierdzić, że ryzyko uszkodzenia słuchu znacząco maleje. Niemniej jednak narażenie na uciążliwy hałas w ciągu dnia może pociągać za sobą skutki pozasłuchowe, do których można zaliczyć: rozdrażnienie, zmęczenie, ból głowy, dodatkowy stres.

Na podstawie przeprowadzonych badań słuchu metodą DPOAE nie udało się jednoznacznie wykazać negatywnego wpływu hałasu panującego na przerwie na słuch narażonych na niego osób. Może to mieć związek z licznymi trudnościami we właściwym przeprowadzeniu badań. W dwóch przypadkach pomiary słuchu przeprowadzono w zmiennych warunkach akustycznych. Odnotowano przypadki wpływu zakłóceń zewnętrznych na wynik pomiaru.

Ankiety wykazały, że uczniowie są narażeni na hałas nie tylko wynikający z miejskiego charakteru ich zamieszkania czy wpływu hałasu sąsiedzkiego. Szkoła jest również miejscem, gdzie spotykają się oni z dźwięki o nadmiernym poziomie. Rodzaj szkoły, warunki w niej panujące czy dodatkowe czynniki takie, jak np. obecność radiowęzła mają istotny wpływ na poziom hałasu, co potwierdzają zarówno wyniki

ankiet, jak i pomiary poziomów dźwięku wykonane podczas przerw i w trakcie lekcji. Zaobserwowano, że uczniowie wraz z wiekiem wykazują większą tolerancję na nadmierny hałas w swoim otoczeniu. W bardzo młodym wieku raczej go unikają, w późniejszym wieku dobrowolnie poddają się ekspozycji na dźwięki o dużym poziomie.

Analizując otrzymane wyniki pomiarów hałasu i słuchu dla rozpatrywanych klubów oraz prób zespołu muzycznego, stwierdzono znaczne przekroczenia dobowej dawki hałasu. Obserwowano znaczącą degradację odpowiedzi ślimaka wyrażoną przez spadek poziomu sygnału otoemisji akustycznej produktów nieliniowych ślimaka. Wyniki pomiarów metodą DPOAE potwierdzają dane uzyskane za pomocą audiometrii tonalnej. Obserwowano znaczące pogorszenie czułości słuchu u wszystkich osób biorących udział w badaniach.

Wyniki pomiarów hałasu i słuchu dla ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3 wyraźnie wskazują, że tego rodzaju odsłuch może stanowić zagrożenie dla słuchu w przypadku ustawień wzmocnienia głośności przekraczających 2/3 dostępnej skali. Pomierzone poziomy hałasu silnie zależą od parametrów elektroakustycznych poszczególnych modeli odtwarzaczy. Odsłuch dźwięków dla niższych wartości wzmocnienia może mieć pozytywne implikacje przejawiające się zwiększoną stymulacją ucha wewnętrznego.

Zastosowanie MSMH do pomiaru zagrożeń hałasem w warunkach rzeczywistych miało na celu udowodnienie tezy 1 niniejszej rozprawy doktorskiej:

Opracowany system teleinformatyczny pozwala na efektywne gromadzenie i przetwarzanie danych dotyczących zagrożeń hałasem poprzez określanie skutków słuchowych hałasu w trakcie trwania ekspozycji.

Opierając się na uzyskanych wynikach praktycznej implementacji zaproponowanych metod oceny szkodliwości hałasu oraz zastosowaniu ich od oceny warunków akustycznych dla różnych rodzajów aktywności, można stwierdzić, że **teza 1** rozprawy została udowodniona.

7. PSYCHOAKUSTYCZNY DOZYMETR HAŁASOWY

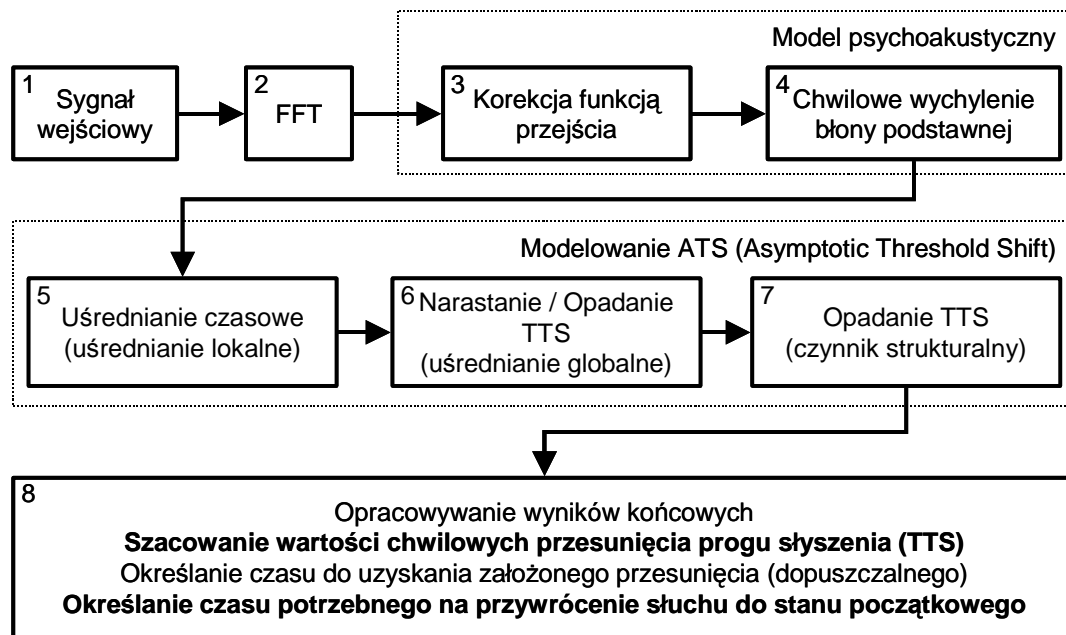
W niniejszym rozdziale przedstawiono autorską koncepcję i praktyczną realizację psychoakustycznego dozymetru hałasowego (PDH). Zaprezentowane wyniki analiz mają na celu udowodnienie słuszności **tezy 2**, postawionej w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Zaproponowana koncepcja stanowi odmienne podejście do problemu dozymetrii przeciwhałasowej. W aktualnym podejściu wyznacza się dawkę energii akustycznej, na jaką była narażona osoba przebywająca w określonych warunkach akustycznych. Zaproponowana metoda polega na modelowaniu skutków, jakie może wywołać hałas, na który narażona jest dana osoba. Uwzględnia on procesy zachodzące w uchu wewnętrznym. Na podstawie pomiaru chwilowej wartości poziomu ciśnienia akustycznego wyznaczana jest wartość chwilowego przesunięcia progu słyszenia.

Współczesne metody szacowania ryzyka uszkodzenia słuchu bazują głównie na hipotezie jednakowych energii. Podejście to koncentruje się głównie na wyznaczeniu ilości energii oddziałującej na narząd słuchu. Zaniedbuje się charakter czasowy sygnału, a główny nacisk położony jest na określenie wartości poziomu równoważnego hałasu. W wielu przypadkach podejście to może być jednak niewystarczające. Analiza licznych danych literaturowych [4][16][29][45][74][85][143][190], obejmujących badanie skutków ekspozycji na różnego rodzaju hałas dostarcza wiedzy, że charakter czasowy i widmo hałasu mają istotne znaczenie w procesie powstawania ubytków słuchu [49][69][114][189]. Biorąc pod uwagę te dane, w rozprawie zaproponowano nową metodę szacowania ryzyka uszkodzenia słuchu w oparciu o modelowanie skutków oddziaływania danego rodzaju hałasu na słuch. Użyto do tego celu zmodyfikowanego modelu psychoakustycznego Johnstona [21][94][166]. Umożliwia on wyznaczenie globalnego wychylenia błony podstawnej.

Na rysunku 7.1 przedstawiono ogólny schemat psychofizjologicznego dozymetru hałasowego. Jego działanie opiera się na prowadzeniu analizy odpowiedzi błony podstawnej na hałas w pasmach krytycznych słuchu [168]. W pierwszym kroku wyznaczane jest widmo mocy sygnału za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (blok 2) [146][178]. Następnie w bloku 3 jest ono korygowane funkcją przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego [94]. W kroku 4 poszczególne współczynniki widmowe są grupowane w pasma krytyczne, w oparciu o skalę barkową [212].

Następnie wyznaczany jest poziom sygnału w poszczególnych pasmach krytycznych. Wynik ten stanowi pobudzenie błony podstawnej. Jej odpowiedź jest wyznaczana przez przemnożenie poziomów chwilowej wartości pobudzenia z charakterystykami filtrów słuchowych dla poszczególnych pasm krytycznych. Uzyskana wartość wychylenia błony podstawnej jest następnie uśredniana wykładniczo. Działanie to odzwierciedla bezwładność procesów zachodzących w uchu wewnętrznym. Uśrednione wartości są następnie wykorzystywane do wyznaczenia asymptotycznego przesunięcia progu słyszenia (ATS) [125].



Rys. 7.1. Schemat blokowy Psychoakustycznego Dozymetru Hałasowego

Blok ATS składa się z trzech części (blok 5, 6, 7). W kolejnym kroku chwilowe wartości ATS są podawane na blok 5, odzwierciedlający mechanizm refleksu akustycznego. Zastosowana implementacja polega na lokalnym uśrednianiu poziomu ATS zgodnie z czasem trwania efektu refleksu akustycznego. W praktyce oznacza to chwilowe podtrzymanie poziomu ATS (uśrednianie lokalne), szczególnie w przypadku gwałtownej zmiany poziomu ATS. Sytuacja taka ma miejsce w przypadku pojawienia się w sygnale nagłych zmian poziomu dźwięku (pojawienie się impulsu). W ten sposób przetworzone wartości ATS podlegają ostatecznie uśrednieniu eksponencjalnemu (blok 6), które odzwierciedla proces czasowego przesunięcia progu słyszenia (uśrednianie globalne) [125]. Blok 7 jest aktywowany w momencie zakończenia ekspozycji, gdy poziom hałasu nie wywołuje już efektu TTS. Jego zadaniem jest odzwierciedlenie zmian zanikania procesu TTS na skutek mechanicznego nadwyżerzenia delikatnych

struktur ślimaka. Blok ten jest aktywowany poziomem TTS istniejącym w momencie zakończenia ekspozycji.

W bloku 8 opracowywane są wyniki końcowe, gotowe do prezentacji i zapisu do pliku. Model umożliwia zatem wyznaczenie: wartości TTS w pasmach krytycznych, czasu pozostałego do uzyskania zadanego przesunięcia progu słyszenia, czasu niezbędnego do przywrócenia progu słyszenia do wartości początkowej. Bardzo ważną cechą proponowanego dozymetru jest fakt, że **umożliwia określenie przesunięcia progu słyszenia dla danego hałasu już w czasie trwania ekspozycji.**

7.1. Modelowanie skutków ekspozycji na hałas

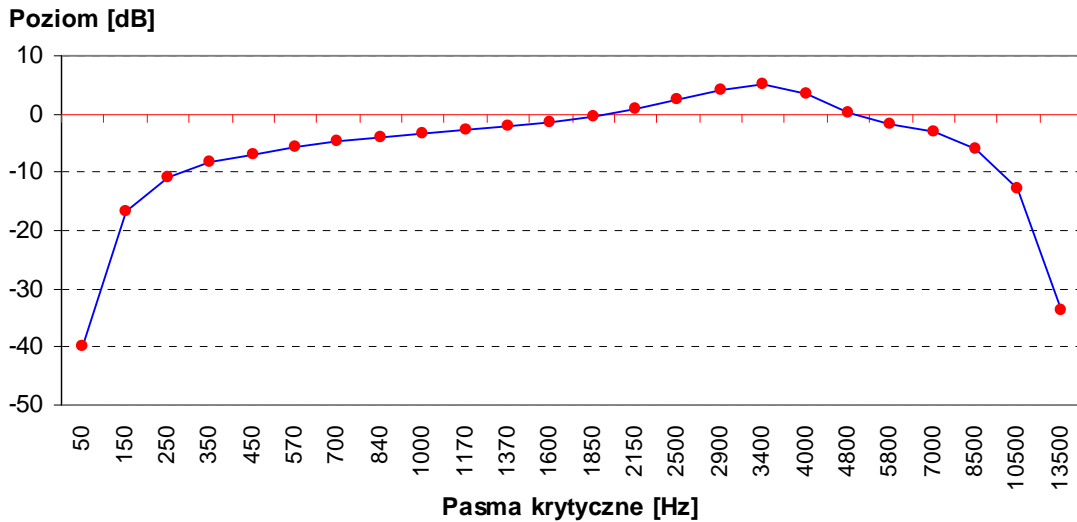
Współcześnie w procesie określania dawki hałasu dostarczonej do narządu słuchu wykorzystuje się krzywą korygującą A, której zadaniem jest odwzorowanie czułości słuchu dla małych poziomów dźwięku. Jej kształt pomija, istotne z punktu widzenia transmisji dźwięku do ucha wewnętrznego, podbicie poziomu w zakresie 2000 ÷ 5000 Hz. Liczne prace dotyczące powstawania ubytków słuchu wywołane hałasem wykazują, że negatywne skutki oddziaływania hałasu są najszybciej dostrzegalne w formie ubytków na wysokich częstotliwościach [11]. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku długotrwałej ekspozycji na hałas o względnie niskim poziomie (85 dBA) [16]. W przypadku ekspozycji na hałas impulsowy o wyższym poziomie równoważnym stwierdzono ubytki w zakresie 4000 Hz. Typowym objawem uszkodzenia słuchu wywołanym hałasem jest selektywne podwyższenie progu słyszenia w okolicy 4000 lub 6000 Hz (ubytek typu *Notch*) [123]. Oznacza to, że stosowanie krzywej korygującej o charakterystyce A przy ocenie hałasu nie zabezpiecza w wystarczającym stopniu słuchu dla częstotliwości, dla których jest on najbardziej czuły.

7.1.1. Funkcja przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego

W celu dokładniejszego oszacowania uszkodzenia słuchu zdecydowano się na zastosowanie modelu psychoakustycznego. W modelu tym czułość słuchu jest odwzorowana za pomocą funkcji przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego. Równanie opisujące funkcję przejścia (L_{TH}) w funkcji częstotliwości (f) zaproponowane przez Terhardta ma postać [192]:

$$L_{TH}(f) = 3,64 \cdot (f/1000)^{-0,8} - 6,5 \cdot \exp(-0,6 \cdot (f/1000 - 3,3)^2) + 10^{-3} \cdot (f/1000)^{-4} \quad (7.1)$$

Na rysunku 7.2 przedstawiono wykreśloną charakterystykę przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego. Zaznaczono dyskretne wartości tej funkcji dla częstotliwości środkowych kolejnych pasm krytycznych.



Rys. 7.2. Funkcja przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego

7.1.2. Pasma krytyczne

Pasma krytyczne zastosowane w opracowanym algorytmie zaczerpnięto z literatury [55][212]. W tabeli 7.1 zestawiono dokładne ich parametry, tzn. numer pasma krytycznego, odpowiadającą mu wartość wyrażoną w barkach, dolną (f_d), środkową (f_c) i górną (f_g) częstotliwość oraz dodatkowo szerokość każdego pasma (f_g-f_d).

Tabela 7.1. Zakresy częstotliwości dla poszczególnych pasm krytycznych. Częstotliwości podano w Hz [55][212]

Nr pasma	Bark	f_d	f_c	f_g	f_g-f_d	Nr pasma	Bark	f_d	f_c	f_g	f_g-f_d
1	0-1	0	50	100	100	13	12-13	1720	1850	2000	280
2	1-2	100	150	200	100	14	13-14	2000	2150	2320	320
3	2-3	200	250	300	100	15	14-15	2320	2500	2700	380
4	3-4	300	350	400	100	16	15-16	2700	2900	3150	450
5	4-5	400	450	510	110	17	16-17	3150	3400	3700	550
6	5-6	510	570	630	120	18	17-18	3700	4000	4400	700
7	6-7	630	700	770	140	19	18-19	4400	4800	5300	900
8	7-8	770	840	920	150	20	19-20	5300	5800	6400	1100
9	8-9	920	1000	1080	160	21	20-21	6400	7000	7700	1300
10	9-10	1080	1170	1270	190	22	21-22	7700	8500	9500	1800
11	10-11	1270	1370	1480	210	23	22-23	9500	10500	12000	2500
12	11-12	1480	1600	1720	240	24	23-24	12000	13500	15500	3500

7.1.3. Filtry słuchowe

W procesie wyznaczania dawki hałasu dostarczonej do konkretnego pasma krytycznego istotne znaczenie ma właściwe modelowanie charakterystyki filtrów słuchowych. Charakterystyka pojedynczego filtra słuchowego określa odpowiedź ucha wewnętrznego na zadane pobudzenie. W przypadku stymulacji sygnałem tonalnym można zauważyć, że w pewnym stopniu pobudzane są również komórki rzęskowych w sąsiednich pasmach krytycznych. Jest to bezpośrednio związane z wychyleniem błony podstawnej, na której te komórki się znajdują [132]. Oznacza to, że do tych komórek również jest dostarczana pewna porcja energii (pomimo, iż w tym paśmie w sygnale pobudzającym nie ma składowych mogących wywołać to pobudzenie). Poziom tej energii zależy od wychylenia błony podstawnej, które z kolei zależy od całkowitego poziomu sygnału akustycznego dostarczanego do ucha wewnętrznego. W pierwotnym modelu psychoakustycznym Johnstona filtr słuchowy był modelowany za pomocą charakterystyki, której kształt nie zależał od poziomu sygnału wejściowego. W przypadku modelowania ryzyka uszkodzenia słuchu takie podejście stanowi zbyt duże uproszczenie, ze względu na fakt, iż często interesuje nas ekspozycja na hałas o dużych poziomach. W takich przypadkach istotne staje się bardziej wierne odwzorowanie kształtu charakterystyki filtra słuchowego. W tym celu zastosowano kształt filtra słuchowego, zaproponowanego przez Terhardta, w którym nachylenie prawego zbocza zmienia się zależnie od poziomu dźwięku [192]. Równanie opisujące charakterystykę filtra słuchowego ma postać:

$$S_{dB}(i, l, E) = \begin{cases} 27 \cdot (i - l) \cdot \Delta z, & i \leq l, \\ \left(-24 - \frac{230}{f_c[l]} + 2 \cdot \log_{10} E \right) \cdot (i - l) \cdot \Delta z, & i > l, \end{cases} \quad (7.2)$$

$S_{dB}(i, l, E)$ – poziom filtra słuchowego wyrażony w dB,

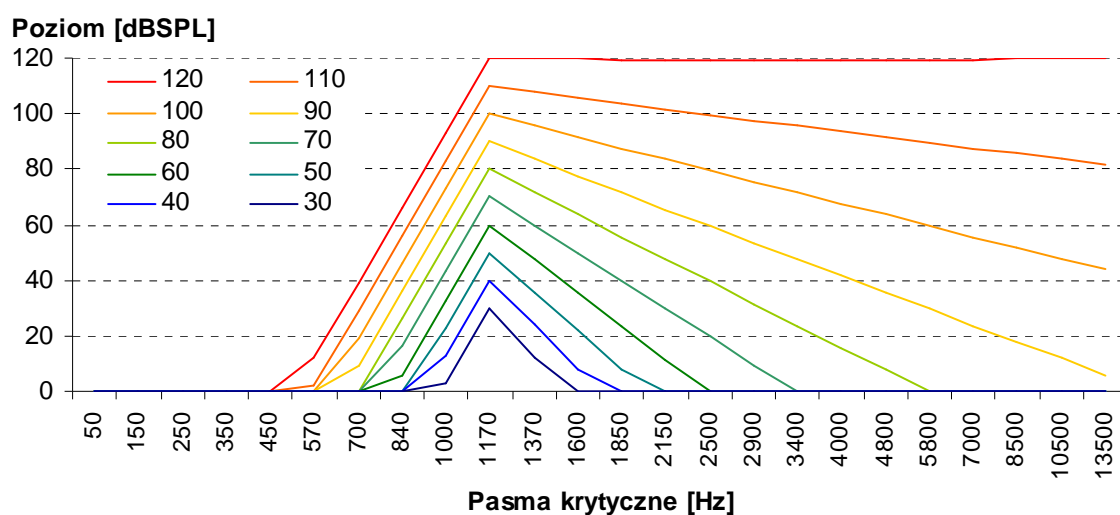
i, l – indeksy kolejnych pasm krytycznych,

Δz – różnica wyrażona w barkach pomiędzy kolejnymi indeksami i, l (w rozpatrywanym przypadku wynosi ona 1),

E – poziom dźwięku w i – tym paśmie krytycznym,

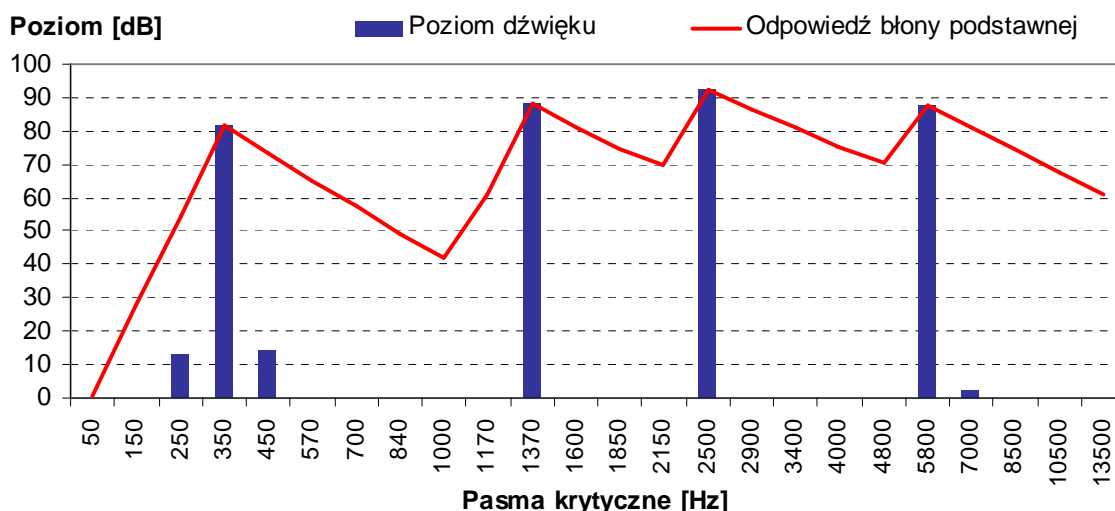
$f_c(l)$ – częstotliwość środkowa pasma krytycznego wyrażona w Hz.

W opracowanym, psychoakustycznym dozymetrze hałasowym, w celu przyspieszenia działania algorytmu, stabelaryzowano funkcje przejścia dla każdego pasma krytycznego. Wyznaczono bank filtrów słuchowych z rozdzielczością 1 dB w zakresie od 25 do 125 dB SPL. Podczas wyznaczania odpowiedzi błony podstawnej odpowiednie charakterystyki są dobierane w zależności od poziomu dźwięku w danym paśmie krytycznym. Na rysunku 7.3 przedstawiono przykładowy bank filtrów słuchowych. Są to charakterystyki uzyskane dla pobudzenia tonem prostym o częstotliwości 1 kHz, obliczone ze wzoru 7.2. Poziom sygnału wejściowego zwiększano o 10 dB w przedziale od 30 do 120 dB SPL. Bardzo wyraźnie widoczne jest działanie filtru słuchowego. Prawe zbocze filtru opada coraz łagodniej przy zwiększaniu poziomu wejściowego.



Rys. 7.3. Kształt filtru słuchowego dla różnych poziomów pobudzenia

Na rysunku 7.4 przedstawiono działanie modelu psychoakustycznego. Sygnałem pobudzającym jest wieloton. Wykres słupkowy przedstawia poziom dźwięku po korekcji funkcją przejścia w pasmach krytycznych. Linia ciągła przedstawia sumaryczne wychylenie błony podstawnej (odpowiedź ucha wewnętrznego wynikająca z poziomu pobudzenia w pasmach krytycznych oraz odpowiedzi filtrów słuchowych). W tym miejscu należy nadmienić, że w omawianym algorytmie nie są rozważane efekty maskowania. Autor niniejszej rozprawy ma świadomość istnienia tych zjawisk w czasie trwania ekspozycji, skoncentrował się jednak na opisie czynników prowadzących do powstawania efektu TTS. Z tego powodu efekty maskowania nie są rozważane.



Rys. 7.4. Sumaryczne wychylenie błony podstawnej na zadane pobudzenie

7.1.4. Poziom ATS

Zaproponowana przez autora niniejszej rozprawy metoda szacowania czasowego przesunięcia progu słyszenia, a w konsekwencji ryzyka uszkodzenia słuchu, opiera się na badaniach nad charakterem narastania i opadania poziomu TTS. Należy wspomnieć o dwóch istotnych parametrach. Pierwszym jest pojęcie „efektywnej ciszy” oraz odpowiadający mu poziom krytyczny; drugim parametrem jest sposób narastania przesunięcia progu słyszenia określane mianem „asymptotycznego przesunięcia progu słyszenia” (*Asymptotic Threshold Shift – ATS*) [125]. Wskaźnik ATS został wstępnie omówiony w rozdz. 3.2.1. W ogólności czynniki te są ze sobą związane właśnie przez wartość poziomu krytycznego. Jest on określany jako poziom hałasu, przy którym obserwuje się ATS wynoszące około 5 dB. Jego wartość zależy od częstotliwości. Wyjaśnienie przyczyny takiego określenia poziomu krytycznego zostało przedstawione poniżej przy dokładniejszym opisie charakteru efektu ATS. Liczni badacze podjęli się określenia dokładnej wartości poziomu krytycznego [128]. Uzyskane przez nich wartości różnią się nieznacznie. W opracowanym, psychoakustycznym dozymetrze hałasowym wartości poziomów krytycznych przyjęto jako wartości pośrednie spośród dostępnych w literaturze. Zestawiono je w tabeli 7.2. Warto podkreślić, że wartości te nie są związane z krzywą korekcji A. W przypadku omawianego modelu zastosowano funkcję przejścia z ucha zewnętrznego do wewnętrznego (rys. 7.2), której kształt różni się od charakterystyki krzywej korekcji A.

W literaturze można spotkać liczne badania, na podstawie których stwierdzono, że istnieje maksymalne przesunięcie progu słyszenia przy danym poziomie hałasu [128].

Jak wcześniej wspomniano, wartość tę określa się pojęciem asymptotycznego przesunięcia progu słyszenia (ATS). Charakter zmiany czasowego przesunięcia progu słyszenia można opisać prostą funkcją wykładniczą [128]:

$$ATS = 1,7 \cdot (10 \cdot \log_{10}((L_e + L_c)/L_c)) \quad (7.3)$$

L_e – poziom sygnału (w opracowanym rozwiązaniu jest to poziom wychylenia błony podstawnej w danym paśmie krytycznym)

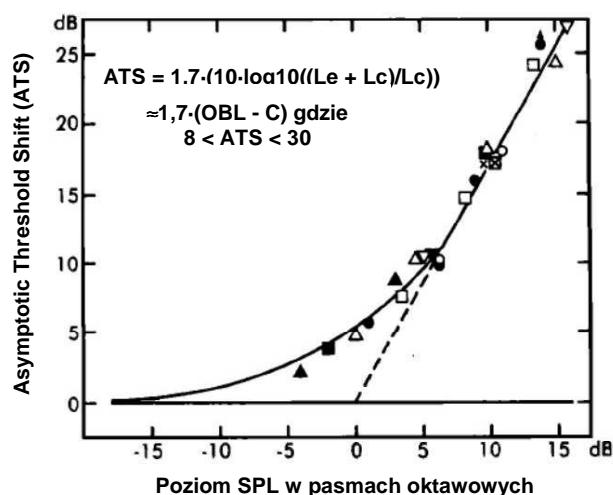
L_c – poziom krytyczny (podany w tabeli 7.2)

Wzór 7.3 określa wartość ATS dla danego poziomu hałasu. Jak podano wcześniej, poziom ATS zależy od częstotliwości [125]. W swoich badaniach Melnick zastrzega, że zależność ta jest słuszna dla ograniczonego zakresu poziomów, tzn. dla poziomów dźwięku, które wywołują ATS w zakresie od 8 do 30 dB. Prace prowadzone przez Clarka z wykorzystaniem zwierząt laboratoryjnych poddanych ekspozycji na wysoki poziom hałasu potwierdzają słuszność opisu ATS nawet dla bardzo dużych wartości ATS (rzędu 60 dB) [29]. Zależność ta jest kluczowa w procesie wyznaczania poziomu TTS w czasie rzeczywistym na podstawie aktualnego poziomu hałasu.

Tabela 7.2. Poziomy krytyczne dla poszczególnych pasm krytycznych użyte w psychoakustycznym dozymetrze hałasowym na podstawie [125]

Numery pasm krytycznych	1-4	5-9	10-11	12-14	15-16	17	18	19	20	21-24
Zakresy częstotliwości [Hz]	0 400	400 1080	1080 1480	1480 2320	2320 3150	3150 3700	3700 4400	4400 5300	5300 6400	6400 15500
Poziom krytyczny L_c [dB SPL]	88	84	82	78	76	75	74	72	68	70

Na rysunku 7.5 przedstawiono wyniki badań ATS z udziałem ochotników uzyskane przez zespół pod kierunkiem Millsa [128]. Przedstawia on znormalizowane wyniki ATS uzyskane dla różnych częstotliwości, zaznaczone na rysunku za pomocą różnych symboli (trójkąty, kwadraty). Linia przerywaną zaznaczono ekstrapolację poziomów ATS za pomocą równania prostej.

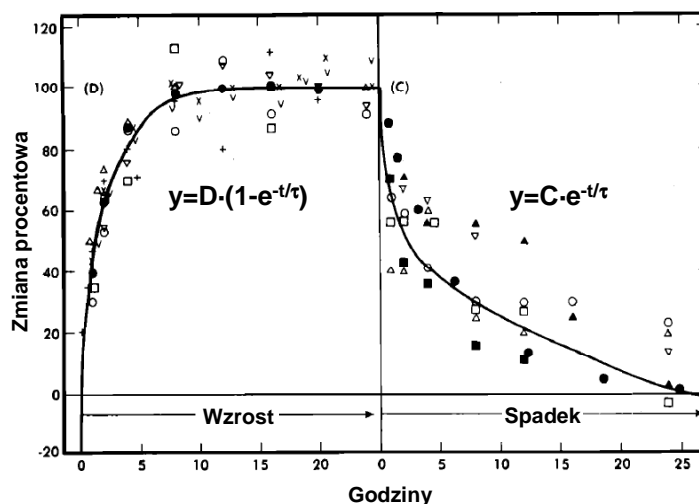


Rys. 7.5. Znormalizowane wyniki badań ATS wg Millsa [128]

Miejsce przecięcia tej hipotetycznej prostej z osią OX (oznaczającej w ogólności poziom hałasu) wyznacza wartość poziomu krytycznego lub też wartość „efektywnej ciszy”. Dla cytowanych wyników badań poziom krytyczny oznacza taką wartość poziomu hałasu, dla której ATS wynosi około 5 dB [125][128]. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że nawet hałas o wartości zbliżonej do poziomu krytycznego może być szkodliwy, ze względu na fakt, iż istotnie zaburza proces naturalnego powrotu progu słyszenia do pierwotnego stanu [85][199].

7.1.5. Narastanie i zanikanie procesu TTS

Do poprawnego zamodelowania zmian czasowego przesunięcia progu słyszenia niezbędna jest znajomość stałych czasowych narastania i zanikania efektu TTS. W cytowanych wcześniej pracach autorzy starają się przedstawić w formie wykresów charakter zmian chwilowej wartości TTS w funkcji czasu ekspozycji (i odpoczynku). Na rysunku 7.6 i 7.7 przedstawiono zmiany w poziomie TTS w funkcji czasu. Rysunek 7.6 przedstawia znormalizowane wyniki badań uzyskane przez zespół Millsa [128]. Poszczególne wyniki cząstkowe zostały zobrazowane na rysunku 7.6 w formie różnorodnych symboli (kółka, kwadraty, trójkąty). W badaniach tych grupa ochotników była poddana działaniu hałasu wąskopasmowemu o stałym poziomie, zlokalizowanemu wokół częstotliwości środkowych wynoszących odpowiednio: 500, 1000, 2000 i 4000 Hz. Poziom ekspozycji wynosił od 75 do 88 dB SPL. Czas ekspozycji: 16 - 25 godzin. Na rysunku tym zamieszczona również została formuła opisująca charakter uzyskanych zmian. Jest nią prosta funkcja wykładnicza, której podstawą jest stała Eulera [144].

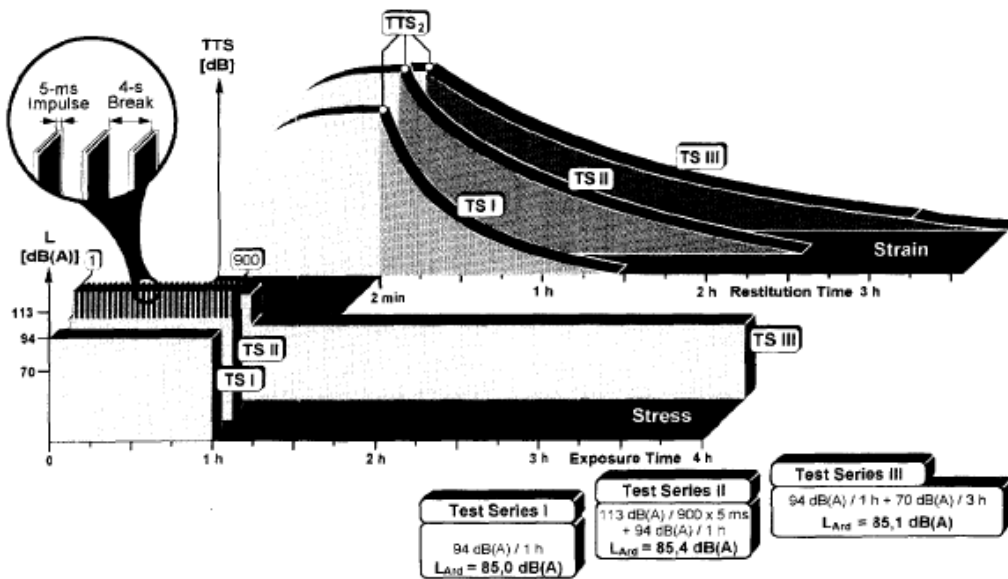


Rys. 7.6. Znormalizowane wyniki zmian poziomu TTS, Widoczna faza narastania i opadania. Podano równania opisujące uzyskane wyniki w formie prostych równań wykładniczych [128]

Stała czasowa w tym przypadku wynosiła 2 godziny. Autor artykułu zastrzega jednak, na podstawie badań dla poziomu 88 dB SPL i szumu o częstotliwości środkowej 4000 Hz, że w tym przypadku zmiana poziomu TTS miała bardziej gwałtowny charakter. Oznacza to, że stała czasowa zmiany poziomu TTS może zależeć od poziomu hałasu, który wywołał TTS. O ile dla niskich poziomów hałasu stała ta jest dość długa, o tyle dla wyższych poziomów hałasu może być ona krótsza. Istotne jest również to, jaka jest stała czasowa dla fazy odpoczynku związana z naturalnym przywracaniem początkowej wartości progu słyszenia.

Nieco inne badania przeprowadził Irle ze współpracownikami [85]. W jego badaniach ochotników poddano trzem różnym ekspozycjom na hałas. W pierwszej podawano hałas o stałym poziomie wynoszącym 94 dBA przy czasie ekspozycji 1 godzina (85 dBA w odniesieniu do 8 godzinnego dnia pracy). W kolejnym przypadku do postaci czasowej dodano krótkotrwałe impulsy o czasie trwania 5 ms, powtarzane co 4 sekundy. Poziom impulsów wynosił 113 dBA, poziom równoważny odniesiony do 8 godzinnego dnia pracy wzrósł nieznacznie i wynosił 85,4 dBA. Czas ekspozycji również wynosił 1 godzinę. W ostatnim przypadku, przez pierwszą godzinę podawano szum o poziomie 94 dBA, następnie poziom szumu zmniejszono do 70 dBA przez kolejne 3 godziny. Poziom równoważny dla tej ekspozycji wynosił 85,1 dBA. Dla każdej ekspozycji mierzono w równych odstępach czasu przesunięcie progu słyszenia. Pozwoliło to ustalić charakter zanikania efektu TTS oraz przedział czasu, po którym

słuch wrócił do stanu początkowego. Na rysunku 7.7 przedstawiono wyniki badań uzyskane przez Irlego i współpracowników [85].



Rys. 7.7. Zmiany poziomu TTS dla różnego rodzaju ekspozycji na hałas o zbliżonym poziomie równoważnym [85]

Analizując przedstawione wyniki, można zauważyć, że charakter zanikania efektu TTS jest również eksponencjalny. Autorzy tych prac w swojej publikacji zamieścili uzyskane równania opisujące charakter zmian TTS. Różnica polega na tym, że w tym przypadku podstawą nie jest stała Eulera, lecz liczba 10. Zanikanie trwa ponadto krócej, niż wynika to z wcześniej cytowanej pracy. Świadczy to przede wszystkim o tym, że efekt TTS jest osobniczo silnie zróżnicowany [128]. Wątpliwości nie budzi jednak charakter zmian, który w prezentowanych przypadkach ma jednoznacznie eksponencjalny charakter. Stała czasowa zmian może zależeć od poziomu dźwięku wywołującego efekt TTS. Dodatkowo należy stwierdzić, że charakter czasowy sygnału ma również istotne znaczenie dla czasu powrotu do stanu początkowego. Dla hałasu o charakterze impulsowym jest on znacznie dłuższy. Ma to związek ze zjawiskiem „refleksu akustycznego” związanego z reakcją ucha środkowego na nagłą zmianę poziomu hałasu. Jeśli amplituda hałasu zmieni się nagle, w czasie krótszym od czasu latencji (wymaganym do zadziałania refleksu akustycznego) wynoszącym od 50 do 150 ms, to mięsień strzemiączkowy nie zdąży zareagować i refleks akustyczny nie spełni swej ochronnej roli [165]. Ponadto, refleks akustyczny zanika po czasie od około 200 ms do 1-2 sekund. Oznacza to, że jeśli impulsy będą się pojawiały rzadziej niż czas

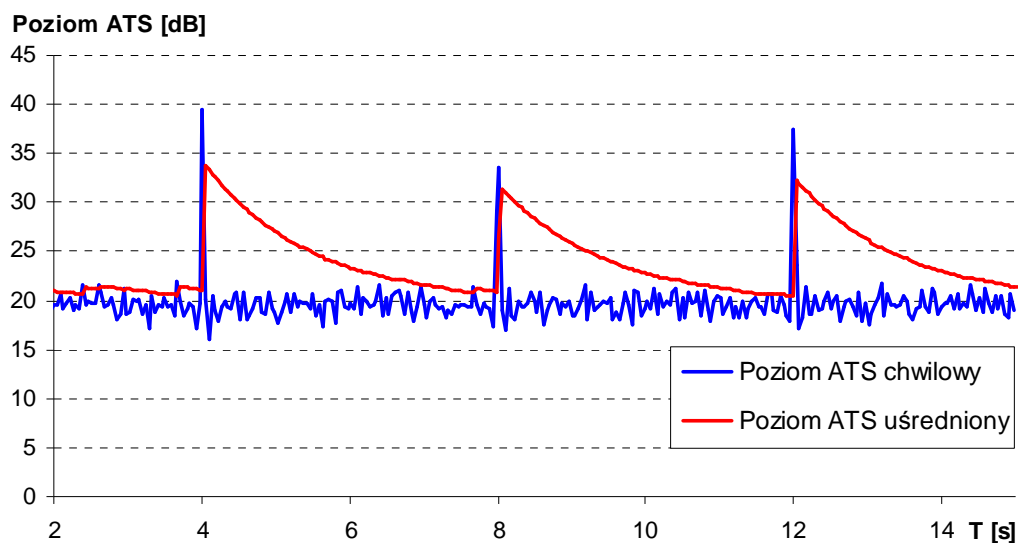
podtrzymania refleksu to również nie spełni on swej ochronnej roli [165]. Z taką sytuacją ma się do czynienia w ekspozycji przeprowadzonej w eksperymencie przeprowadzonym przez Irlego [85]. Analizując dokładniej przywoływane wyniki badań, należy zauważyć, że istotnie dla ekspozycji z impulsami odnotowano wyższy poziom przesunięcia progu słyszenia. Niewiadomą dla każdego rodzaju ekspozycji pozostaje fakt, jak zmieniał się próg słyszenia u badanych osób w fazie ekspozycji.

7.1.6. Refleks akustyczny

Mając na uwadze przedstawione wyżej fakty, w opracowanym dozymetrze wprowadzono moduł, którego zadaniem jest symulowanie działania refleksu akustycznego. Jego działanie polega na wprowadzeniu dodatkowego całkowania wartości ATS. Stałe czasowe lokalnego uśredniania, będące reakcją na zadziałanie refleksu akustycznego zostały zaczerpnięte z literatury. Wynoszą odpowiednio: 35 ms dla fazy narastania i 1,5 s dla fazy zanikania. Moduł ten ma szczególne znaczenie dla odwzorowania dodatkowych, szkodliwych czynników wywołanych nagłą zmianą poziomu dźwięku. Występują one najczęściej, gdy w sygnale hałasu pojawiają się impulsy. W praktyce oznacza to, że wynikowe przesunięcie progu słyszenia, wywołane hałasem o charakterze impulsowym, obliczone za pomocą opracowanego algorytmu będzie wyższe, niż to uzyskane dla hałasu o charakterze stacjonarnym nawet przy zachowaniu zasady równoważności energii. Jest to w ogólności zgodne z powszechnie dostępnymi danymi literaturowymi w zakresie oceny oddziaływania hałasu impulsowego na słuch. Należy jednak podkreślić, że zaproponowane podejście jest znacznym uproszczeniem w rzeczywistości bardzo złożonych procesów zachodzących w ślimaku na skutek oddziaływania hałasu o charakterze impulsowym.

Na rysunku 7.8 przedstawiono przykładowy fragment przebiegu chwilowej wartości ATS obliczonej dla szumu białego o poziomie 94 dBA, zawierającego krótkie 5 ms impulsy o poziomie 113 dBA dla wybranej częstotliwości. Kolorem czerwonym przedstawiono uśredniony przebieg wartości ATS za pomocą modułu lokalnego całkowania, odwzorowującego działanie refleksu akustycznego. Wyraźnie widoczny jest skutek oddziaływania impulsów, polegający na czasowym, krótkotrwałym (w zależności od poziomu impulsu) podwyższeniu wartości ATS. Rozpatrując działanie dozymetru jako całości, uśrednione lokalnie wartości ATS podlegają dalej uśrednianiu globalnemu, a lokalnie podwyższone chwilowe wartości ATS, wywołane pojawiającymi się impulsami, prowadzą do wyższych wartości TTS. Takie działanie

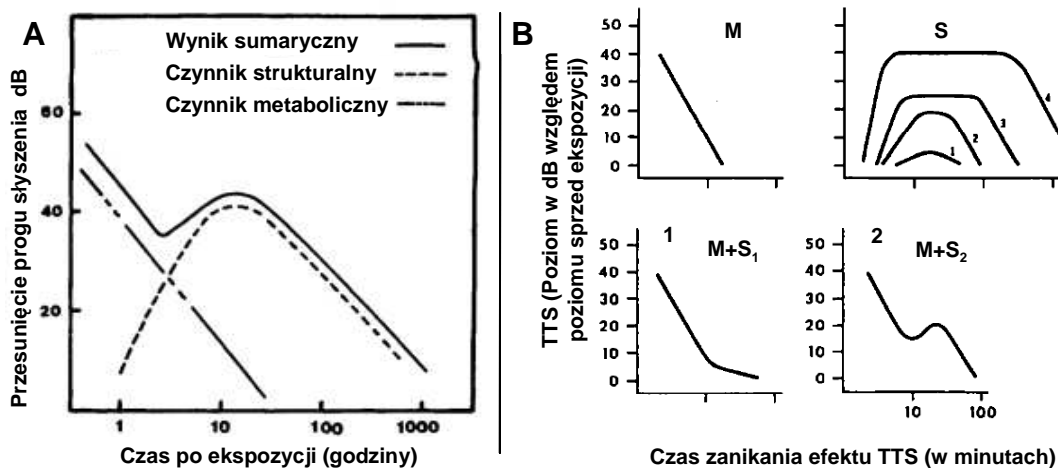
modelu jest również zgodne z danymi pomiarowymi tego zjawiska dostępnymi w literaturze.



Rys. 7.8. Przebiegi czasowe wartości chwilowej i lokalnie uśrednionej poziomu ATS dla wybranej częstotliwości (4 kHz).

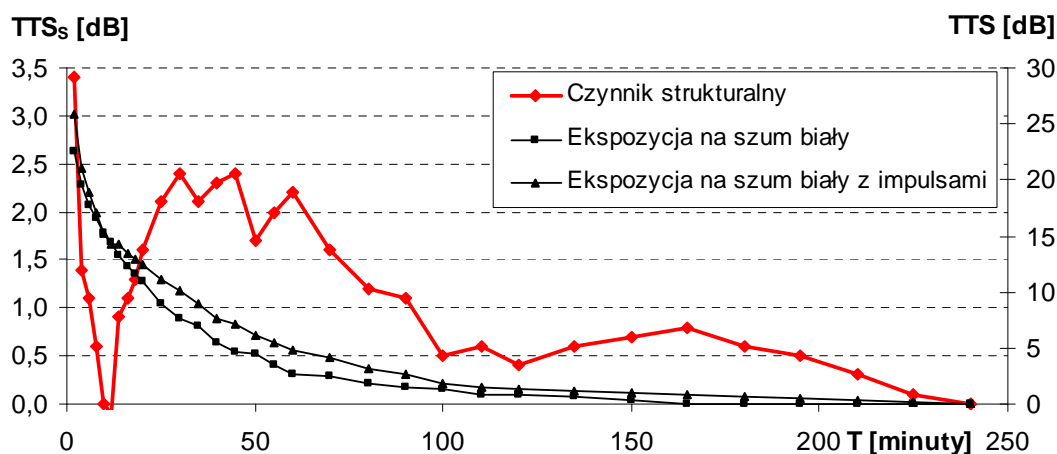
7.1.7. Mechanizm strukturalny

Opierając się na danych literaturowych dotyczących zanikania czasowego przesunięcia progu słyszenia [74], stwierdzono, że można wyróżnić dwa różne procesy, które odpowiadają za powrót słuchu do stanu sprzed ekspozycji. Pierwszym procesem są zmiany metaboliczne, drugim zaś zmiany określane jako strukturalne. Pierwszy proces zanika eksponencjalnie po zakończeniu ekspozycji. Drugi natomiast charakteryzuje się tym, że pojawia się po pewnym czasie po zakończeniu ekspozycji i początkowo powoduje ponowny wzrost poziomu TTS. Po osiągnięciu maksimum stopniowo zanika. Przy bardzo dużym poziomie TTS zmiany strukturalne mogą mieć dominujące znaczenia w procesie zmian przebiegu TTS, ponadto mogą być na tyle poważne, że doprowadzają do trwałego uszkodzenia struktur ucha wewnętrznego [74]. Na rysunku 7.9 przedstawiono udział czynnika metabolicznego i strukturalnego w procesie zanikania efektu TTS, wywołanego ekspozycją na hałas impulsowy [74]. Część A rysunku 7.9 zawiera modelowy przebieg zanikania efektu TTS, uwzględniający czynnik metaboliczny i strukturalny. Krzywe na wykresach oznaczonych 1 i 2 w części B rysunku 7.9 przedstawiają sumaryczny przebieg zanikania procesu TTS powstały w wyniku złożenia charakterystyk oznaczonych symbolem M (czynnik metaboliczny) i S (czynnik strukturalny). Wynikowe krzywe zostały opisane odpowiednio $M+S_1$ i $M+S_2$.



Rys. 7.9. Zanikanie efektu TTS jak suma efektów: metabolicznego i strukturalnego (rys. A). Na rysunku B przedstawiono przykładowy przebieg efektu TTS dla czynnika metabolicznego i strukturalnego, przedstawiono również przykładowe charakterystyki sumaryczne [74][119]

Na podstawie wspomnianych wyżej wyników prac Irlego [85] podjęto próbę opisu czynnika strukturalnego. W tym celu porównano przebiegi wartości średnich określających zanikanie efektu TTS uzyskane dla dwóch różnych ekspozycji na hałas (dla ekspozycji szumem białym i szumem białym z impulsami). Na wykresie 7.10 przedstawiono uzyskany przebieg czynnika strukturalnego. Dodatkowo zamieszczono całościowe przebiegi zanikania efektu TTS dla obu ekspozycji. Wykreślony przebieg jest w ogólności zgodny z przedstawionym czynnikiem strukturalnym. Wyraźnie widoczny jest ponowny wzrost poziomu TTS po pewnym czasie od zaprzestania ekspozycji. Indeks S przy oznaczeniu TTS odnosi się do czynnika strukturalnego.



Rys. 7.10. Różnica w zanikaniu efektu TTS dla dwóch ekspozycji o zbliżonym poziomie równoważnym

W przedstawionym projekcie psychoakustycznego dozymetru hałasowego uwzględniono oba procesy, zarówno metaboliczny, jak i strukturalny, mające zasadnicze znaczenie w zanikaniu efektu TTS. Poniżej przedstawiono opis wyznaczania stałych czasowych narastania i opadania efektu TTS z uwzględnieniem czynnika metabolicznego i strukturalnego.

7.2. Wyznaczanie stałych czasowych narastania i opadania efektu TTS

7.2.1. Czynniki metaboliczny

W prezentowanym psychoakustycznym dozymetrze hałasowym przebieg zmian efektu TTS jest modelowany za pomocą iteracyjnego uśredniania wykładniczego chwilowych wartości parametru ATS. Uśrednianie jest realizowane zgodnie z zależnością 7.4, zaproponowaną przez autora niniejszej rozprawy na podstawie analogii do implementacji uśredniania wykładniczego zrealizowanego w cyfrowych miernikach poziomu dźwięku.

$$\text{TemporalTTS}[i] = a_tts \cdot \text{TemporalTTS}[i] + b_tts \cdot \text{TemporalATS}[i] \quad (7.4)$$

gdzie:

a_tts , b_tts współczynniki obliczone na podstawie wyznaczonych stałych czasowych

$\text{TemporalTTS}[i]$ – chwilowa wartość TTS dla danego pasma krytycznego

$\text{TemporalATS}[i]$ – chwilowa wartość ATS dla aktualnej wartości hałasu, dla danego pasma krytycznego

i – indeks rozpatrywanego pasma krytycznego

$$a_tts = \exp(-1/((f_p \cdot \tau \cdot 60)/(\text{RamkaFFT}))) \quad (7.5)$$

f_p – częstotliwość próbkowania sygnału hałasu, wynosi ona 48000 Hz,

τ – stała czasowa procesu TTS,

RamkaFFT – długość ramki FFT, przyjęta jako 4096

60 – stała wynikająca z przyjętego czasu aktualizacji przebiegu TTS, jest on aktualizowany co 60 sekund.

$$b_tts = 1 - a_tts \quad (7.6)$$

Do wyznaczania czasu zaniku efektu TTS dla czynnika metabolicznego wykorzystano zależność podaną równaniem 7.7. Zakłada ona eksponencjalne zanikanie czasowego przesunięcia progu słyszenia, zgodnie z danymi pomiarowymi uzyskanymi przez zespół Milesa [128]. Działanie dozymetru umożliwia określenie przesunięcia progu słyszenia dla analizowanego hałasu bezpośrednio w trakcie trwania ekspozycji.

$$T_{Recovery,M} = -\tau \ln(\delta/TTS_{inst}) \quad (7.7)$$

gdzie:

τ - stała czasowa dla fazy zanikania efektu TTS,

δ - wartość progowa, oznaczająca, że efekt TTS minął, w algorytmie PDH przyjęto wartość 0,1 dB,

TTS_{inst} - chwilowa wartość poziomu przesunięcia progu słyszenia wykorzystywana do obliczenia parametry $T_{Recovery,M}$.

Wyniki pomiarów słuchu uzyskane w warunkach laboratoryjnych, przedstawione w rozdziale 6, zostały wykorzystane do wyznaczenia stałych czasowych narastania i opadania efektu TTS. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano jedynie ograniczony zbiór wyników. Ze względu na fakt, iż stałe czasowe zmian efektu TTS mają kluczowe znaczenie dla działania opracowanego dozymetru, zdecydowano się przeprowadzić selekcję wyników pomiarów słuchu. Do wyznaczenia stałych czasowych zastosowano tylko te przebiegi zmierzonych wartości TTS, dla których na koniec ekspozycji wystąpiło maksymalne przesunięcie progu słyszenia. Wynika to z faktu, iż te przebiegi są najbardziej wiarygodne. Ponadto, prawdopodobieństwo błędu pomiaru jest w ich przypadku najmniejsze. Wartość przesunięcia progu słyszenia dla pomiaru słuchu przed ekspozycją została przyjęta jako wartość odniesienia i posłużyła do przeskalowania całego przebiegu TTS. Analizę tę przeprowadzono niezależnie dla każdego przebiegu TTS. W ten sposób otrzymano tablicę zmian progów słyszenia. W następnym kroku wyznaczono wartości średnie dla wszystkich faz pomiaru słuchu. Przygotowane w ten sposób wartości zostały wykorzystane do wyznaczenia stałych czasowych.

Proces wyznaczenia stałych czasowych polegał na obliczeniu wartości przesunięcia progu słyszenia za pomocą modelu wykładniczego zastosowanego w projektowanym dozymetrze. Wartości estymowane, wyznaczone przez model, zostały porównane z wartościami pochodzącymi z analizy wyników pomiarów słuchu (dla wartości średniej) dla chwil czasu, w których dokonywano pomiaru słuchu. Dobór stałych czasowych był niezależny dla fazy narastania i opadania. Dla zadanej

kombinacji stałych czasowych wyznaczano sumaryczny błąd średniokwadratowy estymacji przebiegu TTS [144], pomiędzy wartościami obliczonymi przez przyjęty model a wartościami wyznaczonymi na podstawie pomiarów słuchu, określony wzorem 7.8:

$$\Delta a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n}} \quad (7.8)$$

Gdzie:

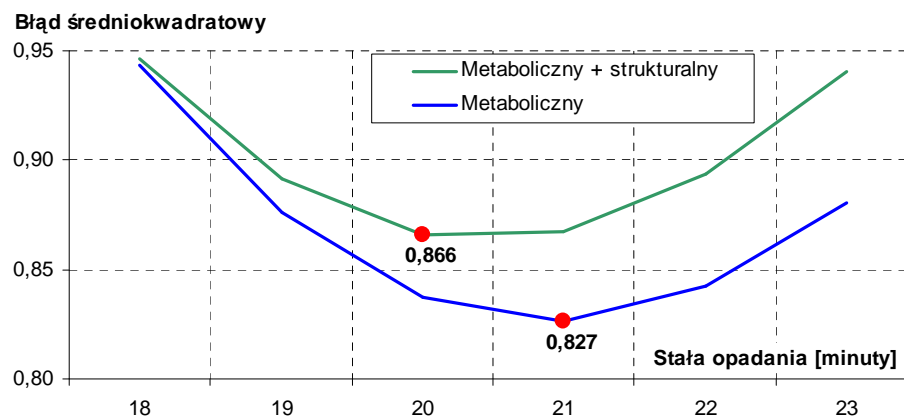
Δa - sumaryczny błąd estymacji przebiegu TTS,

Δa_i - różnica pomiędzy w wartością zmierzona a obliczoną za pomocą przyjętego modelu,

n – liczba punktów pomiaru dla danej charakterystyki przebiegu TTS,

i – indeks kolejnego błędu jednostkowego.

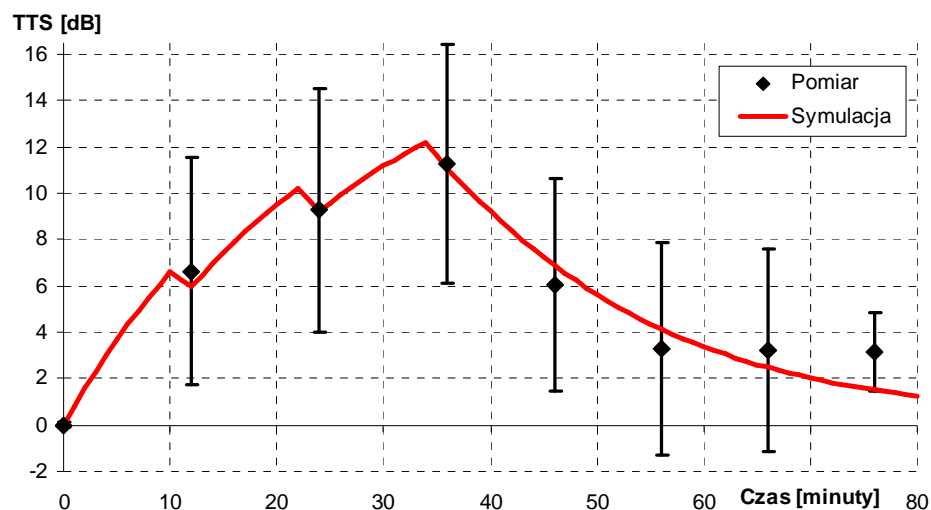
Kryterium wyboru wartości stałych czasowych było uzyskanie możliwie małego błędu pomiędzy wartością estymowaną i wartością średnią. Przyjmując w ten sposób zdefiniowane kryterium, przeprowadzono obliczenia dla różnych kombinacji stałych czasowych dla fazy narastania i opadania efektu TTS. Mając na uwadze fakt, iż przeprowadzone badania mają charakter orientacyjny, przyjęto dla uproszczenia obliczeń dodatkowe założenie, że stałe czasowe są liczbami całkowitymi. Wstępnie określono przedziały wartości poszukiwanych stałych. Wynoszą one 17-23 minuty dla fazy narastania i 18-23 minuty dla fazy opadania. Na rysunku 7.11 zamieszczono wykresy ilustrujące uzyskane wyniki sumarycznego błędu średniokwadratowego dla wybranych kombinacji i złożoności modelu (stała czasowa narastania równa 20 minut).



Rys. 7.11. Błąd średniokwadratowy dla różnych kombinacji stałych czasowych

W pierwszym podejściu uwzględniono jedynie czynnik metaboliczny. W tym przypadku minimum błędu wystąpiło dla kombinacji stałych: 20 minut narastanie, 21 minut opadanie. Dalsze testy modelu dla obliczenia fazy opadania dla hałasów o wyższym poziomie doprowadziły do wprowadzenia uzupełnienia do modelu w postaci czynnika strukturalnego. Jest on szczególnie istotny w przypadku ekspozycji na wysoki poziom hałasu, który prowadzi do znacznie wyższych wartości TTS. Ponowne przeprowadzenie procedury optymalizacji doboru stałych czasowych, tym razem dla rozszerzonego zbioru testowego, doprowadził do uzyskania minimalnego błędu dla kombinacji stałych czasowych 20 minut zarówno dla fazy narastania, jak i opadania. Takie wartości stałych czasowych prowadzą do pewnych uproszczeń w działaniu modelu. Zamiast odrębnych stałych dla fazy narastania i opadania można zastosować jedną dla obu faz.

Końcowy wynik działania modelu dla sygnału testowego stosowanego w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 7.12. Przedstawia on uśrednione wyniki pomiarów słuchu osób biorących udział w doświadczeniu. Dodatkowo przedstawiono rozrzut zmierzonych progów słyszenia wyrażony za pomocą odchylenia standardowego.



Rys. 7.12. Wyniki działania algorytmu PDH dla różnych konfiguracji stałych czasowych w zestawieniu z wynikami badań audiometrycznych

Na tle uzyskanych wartości średnich narysowano krzywą zmiany progów słyszenia dla tej samej częstotliwości, dla której wykonano badanie słuchu (4000 Hz). Wyraźnie widoczna jest duża zgodność obliczonego przebiegu z wartościami reprezentującymi wartości rzeczywiste. Stałe czasowe zostały dobrane właściwie. Na uwagę zasługuje również fakt, iż bardzo dobrze widoczny jest natychmiastowy spadek przesunięcia

progu słyszenia zaraz po zaprzestaniu ekspozycji. Proces ten jest poprawnie odzwierciedlony za pomocą opracowanego algorytmu.

Warto również podkreślić bardzo duże różnice międzyosobnicze w zakresie uzyskiwanych wartości przesunięcia progu słyszenia w badaniu audiometrycznym. Wyrażają to uzyskane wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych częstotliwości. Oznacza to duże zróżnicowanie indywidualnej wrażliwości na urazy akustyczne wśród badanych osób.

Test Pearsona obliczony dla wartości średnich TTS oraz odpowiadających im w danej chwili czasu wartości uzyskanych za pomocą modelu PDH wynosi 0,967 (dla poziomu ufności $\alpha=0,05$ i próby 7-elementowej wartość krytyczna testu Pearsona odczytana z tablic wynosi 0,669 [212]). W świetle otrzymanych wyników nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, która zakłada zgodność (skorelowanie) analizowanych charakterystyk. Oznacza to wysoką korelację pomiędzy danymi pomiarowymi a wartościami pochodzącymi z obliczeń.

7.2.2. Czynniki strukturalny

Przedstawiony wcześniej czynnik strukturalny, występujący w procesie zanikania efektu TTS ma tę naturę, że pojawia się dopiero w przypadku ekspozycji na wysoki poziom hałasu. Z tego powodu można stwierdzić, że będzie dostrzegalny w przypadku wyższych poziomów TTS. Dla małych poziomów TTS czynnik ten będzie pomijalny. Można zatem pokusić się o stwierdzenie, że udział czynnika strukturalnego jest związany z poziomem TTS wywołanym daną ekspozycją na hałas.

Opierając się na cytowanych już wynikach badań zanikania efektu TTS wykonanych przez Irlego [85], podjęto próbę analitycznego opisu tego czynnika. W pierwszym podejściu przyjęto założenie, że stała czasowa zanikania efektu TTS związana z czynnikiem metabolicznym wynosi 21 minut. Po ponownym dokonaniu symulacji dla wyników uzyskanych w warunkach laboratoryjnych stała czasowa opadania ostatecznie wynosiła 20 minut. Poniżej zaprezentowane wyniki zostały uzyskane właśnie dla takiej wartości stałej czasowej zanikania metabolicznego efektu TTS. Obliczono przebieg zanikania efektu TTS zgodnie z modelem eksponencjalnym. Od przebiegu wartości średniej poziomu TTS, obliczonej na podstawie rzeczywistych badań audiometrycznych, odjęto wartości uzyskane dla modelu eksponencjalnego. Przyjęto założenie, że uzyskana różnica określa udział czynnika strukturalnego w procesie zanikania efektu TTS.

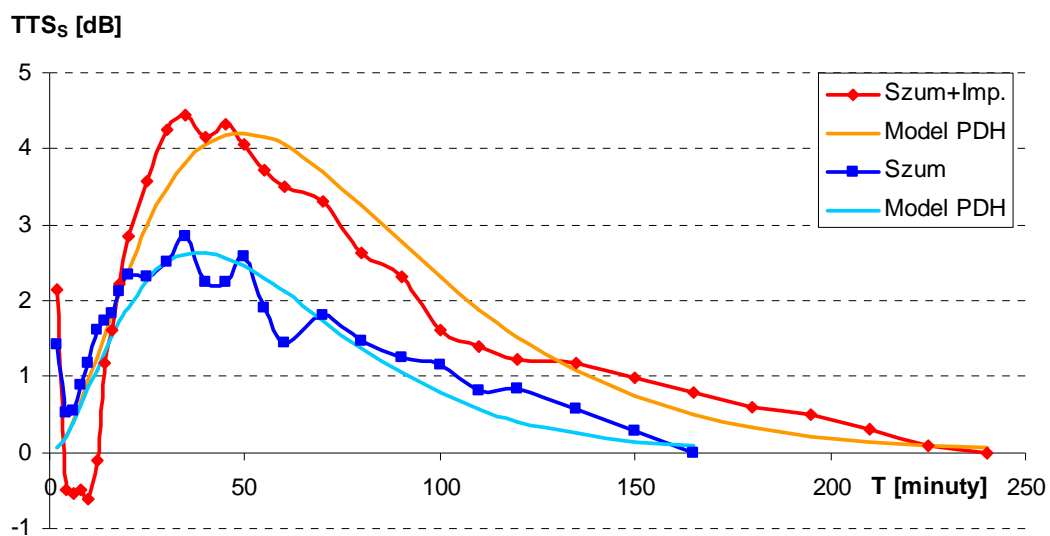
Opierając się na tablicach matematycznych określono w przybliżeniu analityczną postać wzoru, który najlepiej odwzorowuje kształt uzyskanej krzywej. Ma on postać daną wzorem 7.9.

$$y = ax^b e^{cx} \quad (7.9)$$

Do precyzyjnego określenia modelu konieczne jest wyznaczenie stałych a , b , i c , występujących we wzorze 7.9. Kryterium doboru stałych było uzyskanie minimalnego błędu średniokwadratowego pomiędzy przebiegiem wartości średnich zanikania efektu TTS a sumarycznym wynikiem modelu uwzględniającym czynnik metaboliczny i strukturalny. Procedurę ich doboru zamieszczono w załączniku 6. Ostateczny wzór empiryczny ma postać:

$$TTS_S(x) = 0,01896 \cdot x^{1,86536} e^{-0,03789 \cdot x} \quad (7.10)$$

Ostatnim problemem do rozwiązania było znalezienie odwzorowania, które pozwoli na automatyczną aktualizację wzoru 7.10 zgodnie z konkretną wartością poziomu TTS. Eksperymentalnie określono, że wystarczy dokonać modyfikacji stałej c , wyróżnionej kolorem czerwonym we wzorze 7.10. Sposób modyfikacji stałej c określono bazując na wspomnianych przebiegach poziomu TTS dla ekspozycji 88 dBA, 94 dBA i 94 dBA + impulsy. Na rysunku 7.13 przedstawiono przebiegi obrazujące różnice pomiędzy rzeczywistą wartością średnią uzyskaną z pomiarów słuchu a przebiegiem wyznaczonym za pomocą modelu eksponencjalnego.

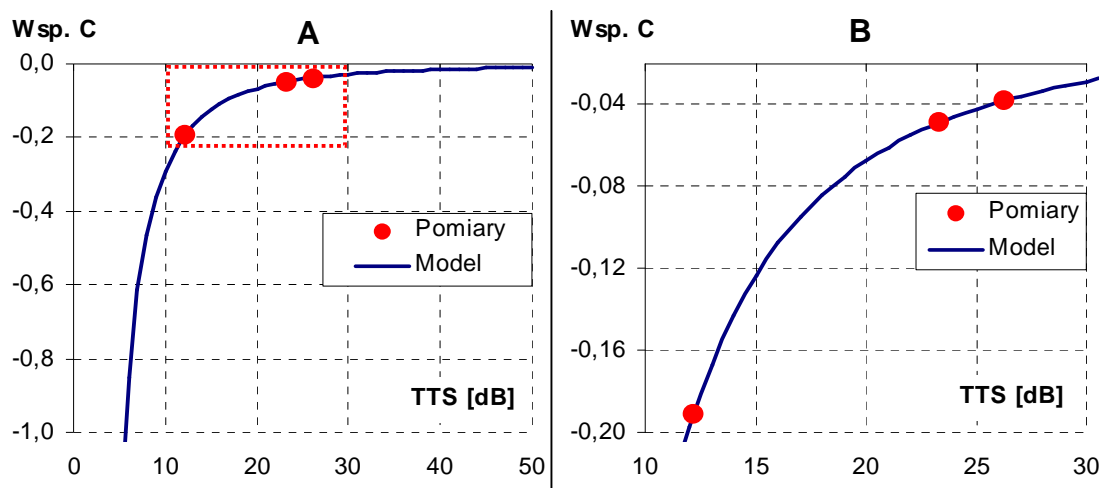


Rys 7.13. Modelowanie czynnika strukturalnego dla wybranych rodzajów ekspozycji

Działania wykonano dla ekspozycji 94 dBA i 94 dBA+impulsy. Dodatkowo na wykresie zamieszczono przebiegi uzyskane za pomocą podanego wyżej wzoru. Należy podkreślić, że przebieg modelu PDH dla ekspozycji szum+impulsy uzyskano wprost ze wzoru 7.10. Przebieg modelu PDH dla sygnału szum wymagał modyfikacji stałej $c = -0,04872$. Przyjęty model nie uwzględnia dużych wahań przebiegów rzeczywistych w początkowej fazie zanikania efektu TTS. Taki kształt przebiegu (szczególnie dla sygnału szum+impulsy) jest spowodowany szybszym zanikaniem efektu TTS bezpośrednio po zakończeniu ekspozycji w stosunku do wartości obliczonych za pomocą przyjętego modelu. Wykonując te same obliczenia dla przebiegu uzyskanego dla ekspozycji o poziomie 88 dBA stała c wynosiła $-0,19101$. Uwzględniając wartości TTS, dla których dokonano oszacowania stałej c , możliwe jest stworzenie wykresu stałej c w funkcji poziomu TTS. Do znalezienia analitycznej wersji odwzorowania zbioru wartości TTS w zbiór wartości parametru c zastosowano potęgowy model regresji. Uzyskany wzór ma postać:

$$c(TTS) = 37,4 \cdot TTS^{-2,12} \quad (7.11)$$

Na rysunku 7.14 przedstawiono uzyskany przebieg funkcji odwzorowującej poziom TTS w wartość współczynnika c .



Rys. 7.14. Przebieg funkcji umożliwiającej wyznaczenie parametru c na podstawie poziomu TTS

Wyznaczanie czasu potrzebnego do zaniku czynnika strukturalnego ($T_{Recovery,S}$) zrealizowano numerycznie, przez iteracyjnie wyznaczenie wartości TTS_S zgodnie ze wzorem 7.10.

7.2.3. Podejście kompleksowe

Połączenie modelu metabolicznego i strukturalnego daje w sumie kompletny opis procesu zanikania efektu TTS. Działanie zaproponowanego modelu zoptymalizowano dla dostępnych przebiegów zanikania efektu TTS. Na rysunkach 7.15 i 7.16 przedstawiono uzyskane przebiegi zanikania efektu TTS, wyznaczone za pomocą opracowanego modelu, w porównaniu do rzeczywistej wartości średniej oraz wyznaczonej dla niej krzywej regresji. Dla obu przypadków obliczono ponadto sumaryczny błąd średniokwadratowy, zarówno dla krzywej regresji, jak i wyniku działania modelu oraz współczynnik korelacji Pearsona. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7.4.

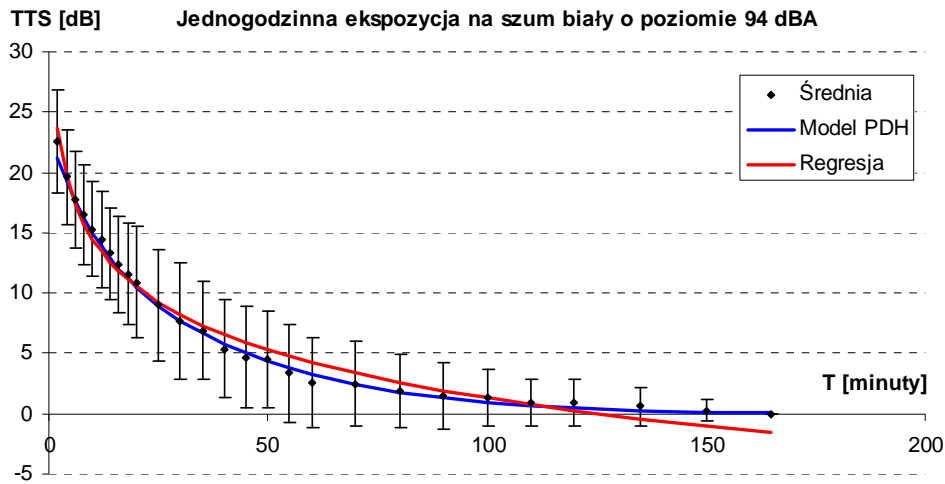
Tabela 7.4. Sumaryczny błąd średniokwadratowy oraz współczynnik korelacji Pearsona dla rozpatrywanych rodzajów ekspozycji

Rodzaj ekspozycji	Funkcja regresji		Opracowany model	
	Błąd średniokw.	Test Pearsona	Błąd średniokw.	Test Pearsona
Szum	0,861	0,992	0,407	0,999
Szum+impulsy	0,828	0,993	0,700	0,995

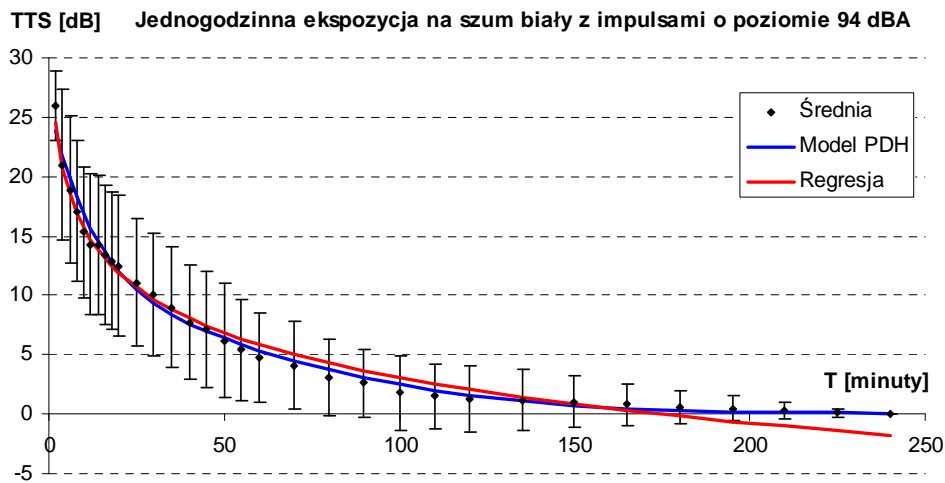
Analizując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że opracowany model bardzo dobrze określa przebieg zanikania efektu TTS zarówno dla ekspozycji na hałas o stałym poziomie, jak i na ekspozycję na hałas o charakterze impulsowym. W obu przypadkach obliczone wartości sumarycznego błędu średniokwadratowego, jak i korelacji względem wartości średniej wyrażonej testem Pearsona są bardziej zgodne niż te uzyskane dla krzywej regresji. Należy zaznaczyć, że błąd średniokwadratowy pomiędzy wartością średnią a modelem i funkcją regresji był liczony dla całego przebiegu zanikania efektu TTS, wyrażonego za pomocą wartości średnich. Z tego powodu funkcja regresji w końcowym przedziale czasu osiąga już wartości ujemne. Dla tego przedziału występuje również znaczne odstępstwo pomiędzy średnią a funkcją regresji. Jest ono widoczne dla obu rodzajów ekspozycji. Wartości ujemne przebiegu funkcji regresji nie stanowią przeszkody w obliczeniu sumarycznego błędu średniokwadratowego. Dla opracowanego modelu efekt taki nie występuje. Godny odnotowania jest również fakt, iż opracowany model może działać dla różnych rodzajów hałasów, za każdym razem dostosowując się do charakteru czasowego i widmowego hałasu. Dzięki temu uzyskane przebiegi procesu TTS poprawnie odwzorowują stan faktyczny. Zaproponowany model zanikania efektu TTS,

uwzględniający czynniki metaboliczne i strukturalne, pozwala na dokładne przedstawienie zmian progu słyszenia po zakończeniu ekspozycji.

W następnym podrozdziale przedstawiono wyniki weryfikacji opracowanego psychoakustycznego dozymetru hałasowego na przykładzie ekspozycji na hałas w wybranych klubach muzycznych.



Rys. 7.15. Porównanie działania całościowego modelu zanikania efektu TTS z przebiegiem wartości średniej i wyznaczonej dla niej krzywej regresji. Ekspozycja na szum biały



Rys. 7.16. Porównanie działania całościowego modelu zanikania efektu TTS z przebiegiem wartości średniej i wyznaczonej dla niej krzywej regresji. Ekspozycja na szum biały z impulsami

Wyznaczenie całkowitego czasu potrzebnego na ustąpienie efektu TTS ($T_{Recovery}$) jest wyznaczane jako czas, po którym sumaryczny poziom TTS przyjmie wartość mniejszą niż 0,1 dB. Jest wyznaczany iteracyjnie. Próg 0,1 dB został przyjęty eksperymentalnie na podstawie przeprowadzonych wyżej zaprezentowanych analiz.

$$TTS_M(t) + TTS_S(t) < 0,1 \quad (7.12)$$

Gdzie:

TTS_M – czynnik metaboliczny, wyznaczany zgodnie ze wzorem 7.4,

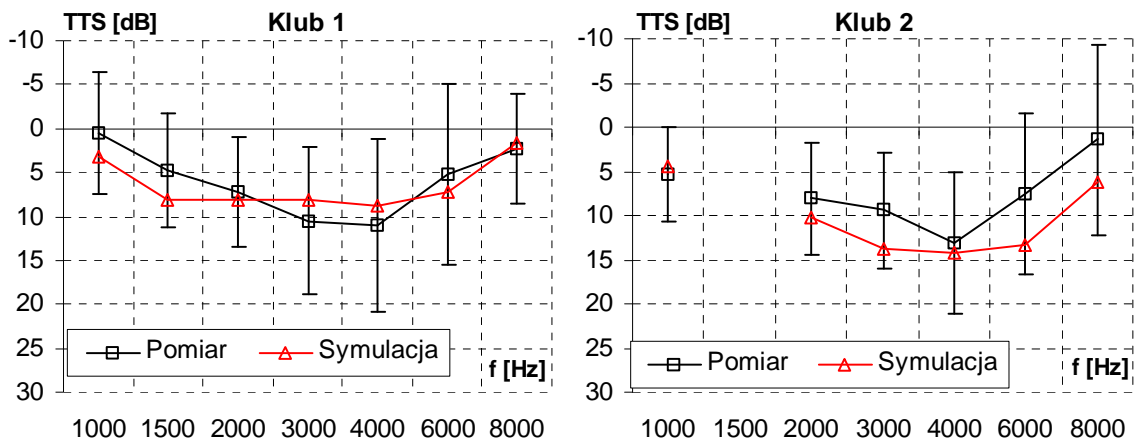
TTS_S – czynnik strukturalny, wyznaczany zgodnie ze wzorem 7.10,

t – czas.

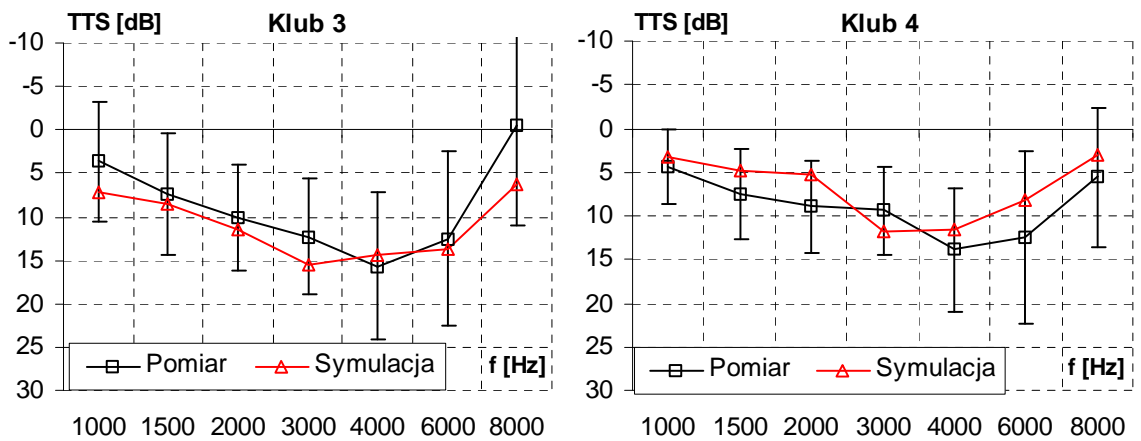
7.3. Weryfikacja PDH w rzeczywistych warunkach ekspozycji

Test sprawdzający poprawne działanie opracowanego modelu został przeprowadzony w oparciu o badania laboratoryjne oraz rzeczywistą ekspozycję w środowisku akustycznym o wysokim poziomie hałasu. Weryfikacja **dotyczy poprawności estymowania czasowego przesunięcia progu słyszenia**. Zadanie to zostało zrealizowane przez poddanie ekspozycji na hałas grupy ochotników (studentów), o słuchu prawidłowym. Eksperyment polegał porównaniu zmierzonych skutków słuchowych (zostały przedstawione w rozdziale 6) z wynikami uzyskanymi za pomocą opracowanego algorytmu PDH.

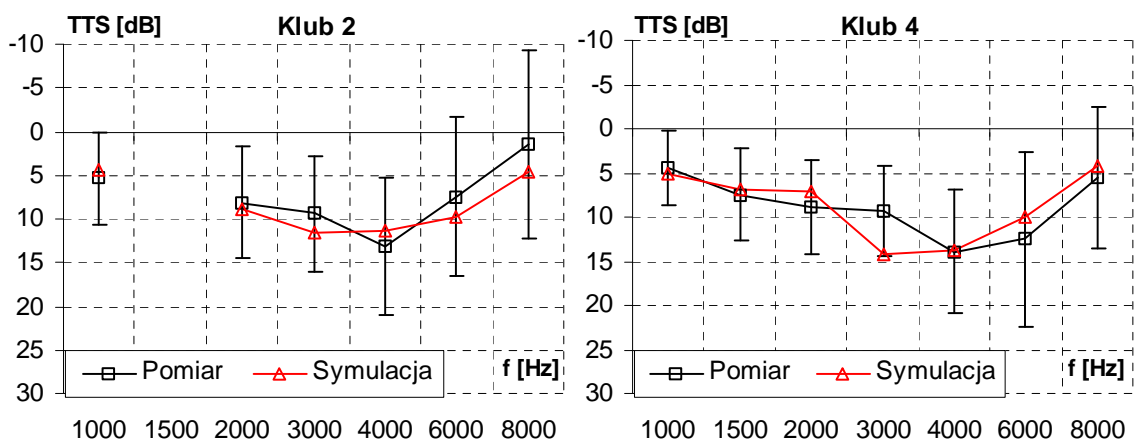
Uzyskane wyniki pomiarów hałasu i słuchu umożliwiają przeprowadzenie dokładnej weryfikacji działania opracowanego dozymetru psychoakustycznego. Weryfikacja ta została przeprowadzona „*off-line*” (po zakończonej ekspozycji). Wynika to z faktu, iż w trakcie prowadzenia badań słuchu i hałasu, algorytm PDH nie był w pełni ukończony. Uzyskane wyniki w warunkach laboratoryjnych posłużyły do optymalizacji działania algorytmu (podanie stałych czasowych narastania i opadania efektu TTS). Przeprowadzono dwa rodzaje symulacji. Pierwszy polegał na wykorzystaniu poziomu równoważnego w pasmach tercjowych, obliczonego dla całego czasu ekspozycji (wykresy 7.17 i 7.18). Drugi rodzaj symulacji został przeprowadzony w oparciu o zapis historii poziomu równoważnego hałasu w pasmach tercjowych dla jednodominutowych interwałów (wykres 7.19). Tego rodzaju dane zostały zgromadzone dla ekspozycji w klubie 2 i 4. W obu przypadkach poziomy hałas przeliczono z widma tercjowego na rozkład poziomów w pasmach krytycznych. Wyniki poziomu TTS, uzyskane za pomocą algorytmu PDH, naniesiono na uśrednione wyniki pomiarów słuchu.



Rys. 7.17. Uzyskane wyniki symulacji zmiany poziomu TTS dla ekspozycji w klubach 1 i 2



Rys. 7.18. Uzyskane wyniki symulacji zmiany poziomu TTS dla ekspozycji w klubach 3 i 4



Rys. 7.19. Uzyskane wyniki symulacji zmiany poziomu TTS dla ekspozycji w klubach 2 i 4, symulacja w oparciu o historię zmian poziomu równoważnego hałasu

Wartości poziomów TTS, estymowane przez algorytm PDH są wyznaczone w pasmach krytycznych. Dla porównania ich z wartościami wyznaczonymi dla wybranych częstotliwości audiometrycznych zastosowano interpolację liniową. W tabeli 7.5 zestawiono wyniki sumarycznego błędu estymacji poziomu TTS w odniesieniu do wartości średnich pochodzących z pomiarów audiometrycznych.

Tabela 7.5. Wyniki sumarycznego błędu estymacji progu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji. Wartości obliczone zgodnie ze wzorem 7.8

Ekspozycja	Klub 1	Klub 2	Klub 3	Klub 4	Klub 2	Klub 4
Sum. błąd estymacji	2,2	3,7	3,3	2,9	2,0	2,2

Dla wyznaczonych za pomocą algorytmu PND charakterystyk czasowej zmiany poziomu progu słyszenia obliczono współczynnik Pearsona względem wartości średnich uzyskanych na podstawie pomiarów audiometrycznych. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7.6. Podano również wartość testu Pearsona dla poziomu ufności $\alpha=0,05$ i próby 6-elementowej (wartość wyróżniona w tabeli kolorem czerwonym) [212].

Tabela 7.6. Wyniki testu Pearsona dla pomiarów rzeczywistych i charakterystyk uzyskanych za pomocą algorytmu PDH.

Ekspozycja	Klub 1	Klub 2	Klub 3	Klub 4	Klub 2	Klub 4	$\alpha=0,05$
Test Pearsona	0,814	0,806	0,931	0,808	0,863	0,806	0,729

Analizując uzyskane przebiegi progów słyszenia oraz biorąc pod uwagę wyniki testu Pearsona należy stwierdzić, że opracowany algorytm PDH we właściwy sposób wyznacza średnie przesunięcie progu słyszenia w zależności od danego rodzaju hałasu (spełniona hipoteza zerowa, zakładająca zgodność analizowanych charakterystyk).

W tabeli 7.7 przedstawiono fragment wyników uzyskiwanych podczas analizy sygnału. Prezentowane wartości obliczane są w czasie rzeczywistym, podczas ekspozycji na hałas. Istnieje możliwość wykonywania dodatkowych analiz bezpośrednio na otrzymywanym zbiorze danych, takich jak: wyszukiwanie częstotliwości, dla których występuje największe przesunięcie progu słyszenia, wyznaczenie maksymalnego czasu niezbędnego do powrotu słuchu do stanu początkowego. Taka analiza może w istotny sposób uzupełnić ocenę zagrożenia hałasem w danym miejscu ekspozycji.

Tabela 7.7 Przykładowe wyniki działania algorytmu PDH. Przedstawiono chwilową wartość TTS, maksymalną wartość ATS (maxATS w dB) oraz przewidywany czas powrotu (T_R) słuchu do stanu początkowego (w minutach)

f [Hz]	TTS	maxATS	T_R	f [Hz]	TTS	maxATS	T_R
50	0,2	0,6	14	1850	9,2	20,1	93
150	1,2	4,5	52	2150	8,5	20,5	91
250	1,3	5,7	54	2500	11,5	25,3	97
350	1,0	4,1	48	2900	11,3	26	97
450	2,1	7,7	63	3400	12,4	28,4	98
570	3,1	8,7	71	4000	11,3	28,2	97
700	4,4	9,5	78	4800	10,0	27,3	95
840	4,9	10,8	80	5800	10,5	29,2	95
1000	4,3	11,4	78	7000	6,1	21,5	85
1170	5,3	13,7	82	8500	4,0	16,9	76
1370	5,6	13,8	83	10500	1,6	9,3	58
1600	10,4	20,5	95	13500	0,2	2,2	20

7.4. Propozycja nowych wskaźników dozymetrii hałasowej

W trakcie prowadzenia prac nad nową koncepcją dozymetrii hałasowej zdecydowano się na zastosowanie prostego modelu psychoakustycznego do określania skutku wywołanego przez ekspozycję na nadmierny poziom hałasu. Przyjęcie podejścia do problemu dozymetrii od strony skutku, jaki wywołuje hałas w systemie słuchowym odbiorcy prowadzi do sformułowania założenia, że pojawienie się efektu TTS jest reakcją niepożądaną. Na tej podstawie zaproponowano dwa nowe wskaźniki szkodliwości hałasu. Pierwszy łączy wartość przesunięcia progu słyszenia wywołanego hałasem z czasem trwania ekspozycji. Drugi dodatkowo uwzględnia czas niezbędny do ustąpienia efektu TTS. Jak to przedstawiono powyżej, efekt TTS jest wyznaczany niezależnie w pasmach krytycznych. Zatem podczas ekspozycji na hałas dochodzi do różnorodnego odkształcenia progu słyszenia dla poszczególnych częstotliwości. Proces wyznaczania wskaźnika L_{JK} polega na sumowaniu wartości przesunięcia progu słyszenia dla poszczególnych częstotliwości w odstępach 1 minutowych. Uwzględniany jest czas trwania efektu TTS w czasie trwania ekspozycji oraz po jej zakończeniu. Proces powrotu słuchu do stanu sprzed ekspozycji na hałas może dokonać się jedynie wtedy, gdy osoba, u której wystąpiło czasowe przesunięcie progu słyszenia będzie przebywała w warunkach akustycznych dogodnych dla tego procesu. Opierając się na wcześniej cytowanych wynikach badań [85], należy unikać nawet względnie niskich

poziomów hałasu (poniżej 70 dBA). W praktyce oznacza to konieczność przebywania w ciszy.

Opracowany wskaźnik można przedstawić w formie wzoru następująco:

$$L_{JK} = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{T+T_R} \sum_{i=0}^N \left(10^{\frac{L_{TTS}(i,t)}{10}} - 1 \right) \quad (7.13)$$

N – liczba analizowanych pasm (w opisywanym rozwiązaniu 24 pasma krytyczne),

T – czas ekspozycji (wyrażony w minutach),

T_R – czas potrzebny na powrót słuchu do stanu początkowego,

$L_{TTS}(i,t)$ – chwilowa wartość czasowego przesunięcia progu słyszenia dla i -tego pasma krytycznego i dla chwili czasu t .

Czynnik $1/N$ został wprowadzony w celu uniezależnienia uzyskanych wyników od liczby analizowanych pasm. W zaproponowanym wskaźniku sumowanie odbywa się po wszystkich pasmach krytycznych. W ogólności jednak możliwe jest przeprowadzenie obliczeń wartości wskaźników np. w oparciu o analizę w pasmach oktaowych. Wynik otrzymywany za pomocą wyżej zdefiniowanego wskaźnika wyraża sumaryczne, liniowe przesunięcie progu słyszenia wywołane przez ekspozycję na hałas.

Działanie polegające na odjęciu liczby 1 od wyniku zamiany poziomu TTS na wartość liniową jest podyktowane tym, by wartość 0 TTS w skali liniowej było równe 0 TTS w skali decybelowej [13]. Ponadto, w przypadku sumowania algebraicznego wartości wyrażonych w dB prowadzi do sprzecznych wyników. Można to przedstawić na przykładzie porównania wartości uzyskiwanych dla długich ekspozycji, powodującej niewielkie przesunięcie progu słyszenia z ekspozycją krótszą, ale wywołującą znacznie większy poziom TTS. Można by na tej podstawie wyciągnąć błędny wniosek, że ekspozycja powodująca niższy poziom TTS jest bardziej szkodliwa w porównaniu z tą, która wywołuje znacznie wyższy TTS. Z tego powodu zastosowano sumowanie wartości wyrażonych w skali liniowej. Dodatkowo, niewielkie wartości przesunięcia wyrażone w dB dają również małe wartości w skali liniowej (pomniejszone o 1). Dzięki tym zabiegom matematycznym udało się wyeksponować wyższe wartości TTS jako bardziej szkodliwe, nawet dla krótszego czasu oddziaływania hałasu. Odejmowanie liczby 1 od wartości TTS w skali liniowej ma dodatkowo bardzo istotne znaczenie

fizyczne. Otóż, gdyby sumować wartości w skali liniowej bez tej operacji, to dla 0 dB TTS otrzyma się wartość 1 w skali liniowej. Sumowanie wartości 1 przy faktycznym braku zjawiska TTS prowadzi do fałszywych wartości wskaźnika, którego wartość mogłaby sugerować duże zagrożenie dla słuchu. Wprowadzenie odejmowania liczby 1 od wartości TTS w skali liniowej rozwiązało ten problem. Podejście tego typu można również znaleźć w literaturze [13].

Za pomocą wskaźnika L_{JK} możliwe jest wyznaczenie wartości bezwzględnej sumarycznego przesunięcia progu słyszenia, w powiązaniu z czasem jego trwania, wywołanego zadaną ekspozycją na hałas. Wartość bezwzględna nie niesie ze sobą bezpośredniej informacji na temat szkodliwości danej ekspozycji oraz stopnia przekroczenia dopuszczalnej dawki hałasu. Dla przejrzystej interpretacji otrzymanego wyniku wprowadzono parametr odzwierciedlający dawkę przesunięcia progu słyszenia. Jest on opisany wzorem 7.14. Wiąże bezpośrednio wartość wskaźnika L_{JK} dla rozpatrywanej ekspozycji z wartością odniesienia. Parametr D_{JK} oznacza dawkę przesunięcia progu słyszenia wywołaną ekspozycją na hałas.

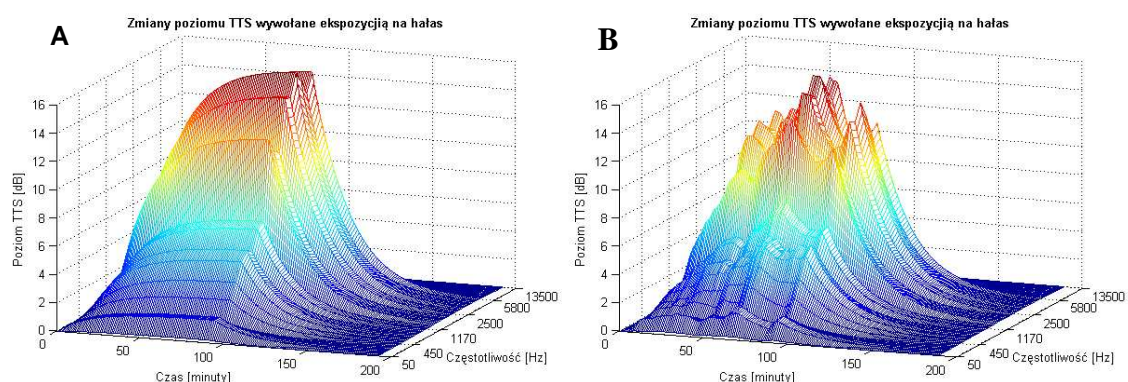
$$D_{JK} = \frac{L_{JKExp}}{L_{JK100}} \cdot 100 \quad (7.14)$$

L_{JKExp} – bezwzględna wartość wskaźnika L_{JK} dla zadanej ekspozycji na hałas,

L_{JK100} – bezwzględna wartość wskaźnika L_{JK} dla dopuszczalnej ekspozycji na hałas, oznaczająca 100% dziennej dawki przesunięcia progu słyszenia.

Na rysunku 7.20 przedstawiono powierzchnie obrazujące zmiany poziomu przesunięcia progu słyszenia w czasie trwania ekspozycji na hałas, wyznaczone przez opracowany algorytm PDH w oparciu o rzeczywiste poziomy hałas. Jak wspomniano w rozdziale 7.4, obliczenia wartości TTS przeprowadzono na podstawie wartości poziomu równoważnego hałasu dla całego czasu ekspozycji (rys. 7.20 A) oraz dla historii zmian poziomu równoważnego hałasu wyznaczanego dla 1 minutowych przedziałów czasu (rys. 7.20 B). Wyraźnie widoczny jest eksponencjalny charakter zmiany czasowego progu słyszenia dla obliczeń uwzględniających poziom równoważny dla całego czasu ekspozycji. Charakterystyki otrzymane dla historii poziomu równoważnego znacznie dokładniej odzwierciedlają aktualny poziom przesunięcia progu słyszenia, wywołanego hałasem. Na wykresie A maksymalne przesunięcie progu słyszenia występuje dla momentu kończącego ekspozycję. Podczas gdy w

rzeczywistości wartość maksymalnego przesunięcia progu słyszenia może wystąpić w innym momencie trwania ekspozycji. Jest to dobrze widoczne na wykresie B.



Rys. 7.20. Zmiana efektu TTS wywołanego hałasem wyznaczona za pomocą algorytmu PDH. Wykresy uzyskane dla wybranej ekspozycji (Klub 2)

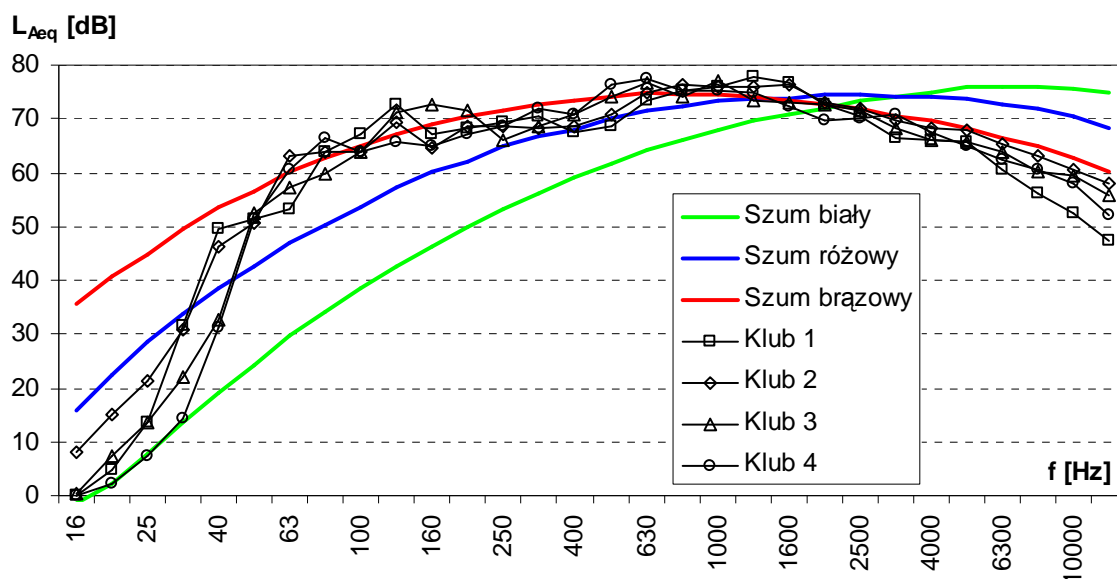
Taki wynik jest typowy dla zastosowania poziomu równoważnego. Wartości TTS eksponencjalnie dążą do poziomów ATS wyznaczonych dla danego pobudzenia. Uwzględnienie historii zmian poziomów hałasu stwarza możliwość dokładnego obliczenia chwilowej wartości TTS. Wykresy uzyskane dla pozostałych ekspozycji zamieszczono w załączniku 7.

7.5. Weryfikacja eksperymentalna zaproponowanych wskaźników

Weryfikację eksperymentalną zaproponowanych wskaźników rozpoczęto od wyznaczenia wartości odniesienia (wartości wskaźnika L_{JK100}). Do wyznaczenia wartości wskaźnika L_{JK100} konieczne było dobranie właściwego rodzaju hałasu o odpowiednim poziomie, czasie trwania i charakterystyce widmowej. W wyborze tym oparto się na aktualnie obowiązujących normach w zakresie przyjętej dopuszczalnej dawki hałasu, wyrażonej poziomem równoważnym. Przyjęto zatem, że poziom sygnału odniesienia będzie wynosił **85 dBA** przy czasie trwania sygnału równym **8 godzin**. Jest to maksymalna dzienna dawka hałasu dopuszczalna ze względu na ochronę słuchu. Biorąc pod uwagę aktualne zalecenia w zakresie stosowania ochronników słuchu, zrezygnowano z zastosowania większego niż 85 dBA poziomu hałasu (oczywiście dla proporcjonalnie krótszego czasu) [209]. Pozostało jedynie do rozstrzygnięcia, jaki charakter sygnału zastosować. Ma to zasadnicze znaczenie, ze względu na fakt, iż zaproponowany psychoakustyczny dozymetr hałasowy uwzględnia w swoim działaniu przebieg charakterystyki widmowej hałasu. W tym celu wytypowano trzy podstawowe rodzaje szumów: biały, różowy i brązowy [79]. Przyjęto, że najbardziej odpowiedni

będzie ten rodzaj szumu, którego rozkład odpowiada hałasom spotykanym w życiu codziennym. Przeprowadzono zatem porównanie rozkładu widmowego poszczególnych rodzajów szumów z widmami hałasów zarejestrowanych w rozpatrywanych klubach.

Procedura porównawcza była następująca: charakterystyki widm dla poszczególnych klubów oraz szumów przeskalowano liniowo tak, aby całkowita wartość poziomu dźwięku była równa 85 dBA. Na rysunku 7.21 przedstawiono wykresy poszczególnych widm analizowanych sygnałów. W celu określenia, który rodzaj szumu jest najbardziej zbliżony z widmami hałasów dla poszczególnych klubów zastosowano test Pearsona. Dodatkowo obliczono błąd średniokwadratowy pomiędzy poszczególnymi sygnałami. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7.8. Analizę przeprowadzono niezależnie dla całego widma tercjowego oraz dodatkowo w zakresie ograniczonym od 50 Hz. Odrzucenie w drugim przypadku najniższych częstotliwości wprowadzono po to, by uwzględnić charakter źródła hałasu. W rozpatrywanych przypadkach były nimi systemy nagłośnieniowe zainstalowane w poszczególnych klubach.



Rys. 7.21. Porównanie widm tercjowych dla klubów i różnych rodzajów szumów. Wszystkie sygnały miały poziom całkowity równy 85 dBA.

Ze względu na ograniczenia tych systemów w zakresie emisji dźwięku dla najniższych częstotliwości, duże tłumienie sygnału wprowadzane przez charakterystykę korekcyjną A oraz małe znaczenie dla wpływu na słuch, poziomy te zostały pominięte. W tabeli 7.8 wyróżniono wartości maksymalne uzyskane dla testu Pearsona, wartości minimalne dla błędu średniokwadratowego (zgodnie ze wzorem 7.8) oraz rodzaj

sygnału, dla którego wartości wyróżnione otrzymano. W każdym przypadku sygnałem wyróżnionym okazał się szum brązowy.

Tabela 7.8. Wyniki analizy porównawczej widm sygnałów testowych i widm hałasów dla poszczególnych klubów, Sz. 1 – szum biały, Sz. 2 – szum różowy, Sz. 3 – szum brązowy

	Obliczenia dla całego pasma						Obliczenia od 50 Hz					
	Test Pearsona			Błąd średniokw.			Test Pearsona			Błąd średniokw.		
	Sz. 1	Sz. 2	Sz. 3	Sz. 1	Sz. 2	Sz. 3	Sz. 1	Sz. 2	Sz. 3	Sz. 1	Sz. 2	Sz. 3
klub1	0,761	0,866	0,967	17,3	10,2	12,3	0,168	0,418	0,884	16,0	8,7	4,7
klub2	0,834	0,918	0,967	16,4	7,2	9,2	0,430	0,640	0,920	14,8	6,6	2,4
klub3	0,822	0,909	0,976	15,6	9,0	12,6	0,311	0,551	0,938	15,3	7,3	2,7
klub4	0,814	0,909	0,969	15,7	10,4	14,4	0,261	0,507	0,934	15,5	7,6	2,9

Opierając się na wynikach przedstawionej analizy, szum brązowy o poziomie 85 dBA oraz czasie trwania 8 godzin, został wybrany jako referencyjny do obliczenia wartości odniesienia wskaźnika L_{JK100} . Wartość ta oznacza dzienne, dopuszczalne, czasowe przesunięcie progu słyszenia wywołane hałasem.

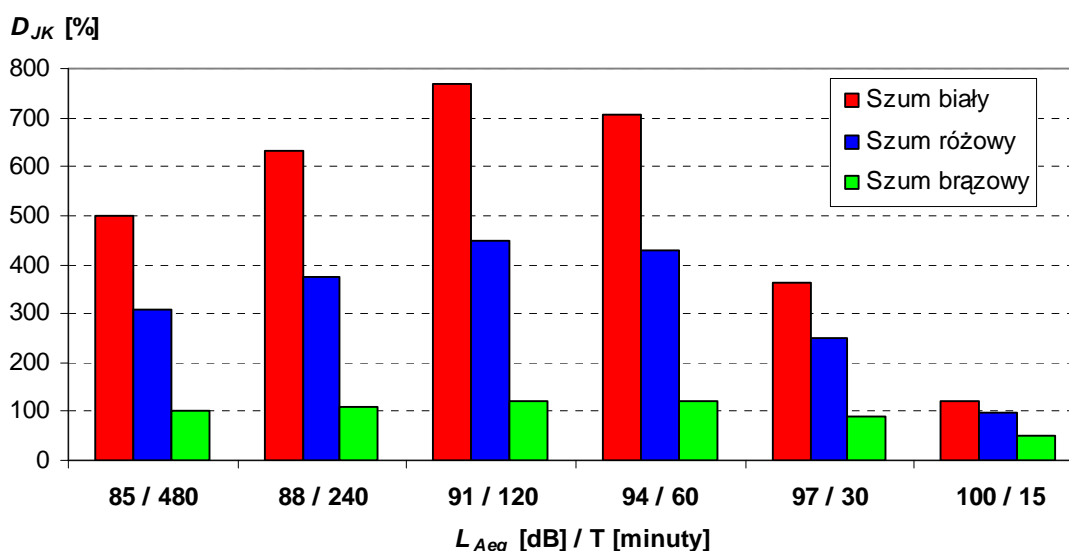
7.5.1. Analiza sygnałów o jednakowym poziomie równoważnym

Działanie opracowanego psychoakustycznego dozymetru hałasowego sprawdzono na przykładzie trzech rodzajów szumu (biały, różowy, brązowy) o poziomach i czasach trwania dobranych zgodnie z zasadą równoważności energii akustycznej. W myśl tej zasady, każdy sygnał zawiera tę samą ilość energii wyrażoną za pomocą wskaźnika L_{Aeq} odniesioną do ośmiogodzinnego dnia pracy. W tabeli 7.9 zamieszczono uzyskane wyniki analiz. Kolorem czerwonym zaznaczono wartość referencyjną dla szumu brązowego o poziomie 85 dBA i ośmiu godzin ekspozycji. Jest ona podstawą do wyznaczenia wartości względnych wskaźnika D_{JK} . Na rysunku 7.22 przedstawiono w formie wykresu uzyskane wyniki względne, określające wartość dawki hałasu rozumianej jako skumulowany skutek oddziaływania hałasu na słuch osoby narażonej. Wyraźnie widoczna jest tendencja, że hałasy, w widmie których dominują wysokie częstotliwości o dużych poziomach stanowią większe zagrożenie dla ucha wewnętrznego niż hałas o charakterze niskoczęstotliwościowym. Jest to zgodne z doniesieniami z literatury dotyczącymi badań nad ekspozycją na hałas [143]. Tendencja ta jest niezależna od poziomu hałasu.

Tabela 7.9. Wyniki analizy różnych sygnałów wyrażone wskaźnikami L_{JK} i D_{JK}

Rodzaj sygnału	Poziom sygnału wyrażony w dBA oraz czas trwania wyrażony w minutach					
	85 / 480	88 / 240	91 / 120	94 / 60	97 / 30	100 / 15
	Wartości bezwzględne, wyrażone za pomocą wskaźnika L_{JK}					
Sz. Biały	19166	24329	29636	27229	13941	4588
Sz. Różowy	11897	14456	17254	16495	9615	3754
Sz. Brązowy	3849	4239	4695	4674	3497	1971
	Wartości względne, wyrażone za pomocą wskaźnika D_{JK}					
Sz. Biały	498	632	770	707	362	119
Sz. Różowy	309	376	448	429	250	98
Sz. Brązowy	100	110	122	121	91	51

Warto zauważyć, że jedynie dla szumu brązowego dawka obliczona za pomocą wskaźnika D_{JK} jest z niewielkim odstępstwem zgodna z zasadą równoważności energii. Istotny spadek wartości wskaźnika D_{JK} dla hałasów o wysokich poziomach równoważnych wynika z uproszczenia, polegającego na przyjęciu jednej stałej czasowej dla narastania i zanikania efektu TTS. Należy oczekiwać, że dla bardzo wysokich poziomów hałasów stała czasowa narastania efektu TTS jest krótsza, zaś dla fazy opadania może być dłuższa. Oznacza to, że dla takiego rodzaju ekspozycji szkodliwe oddziaływanie hałasu w krótszym czasie prowadzi do poważnych urazów akustycznych.



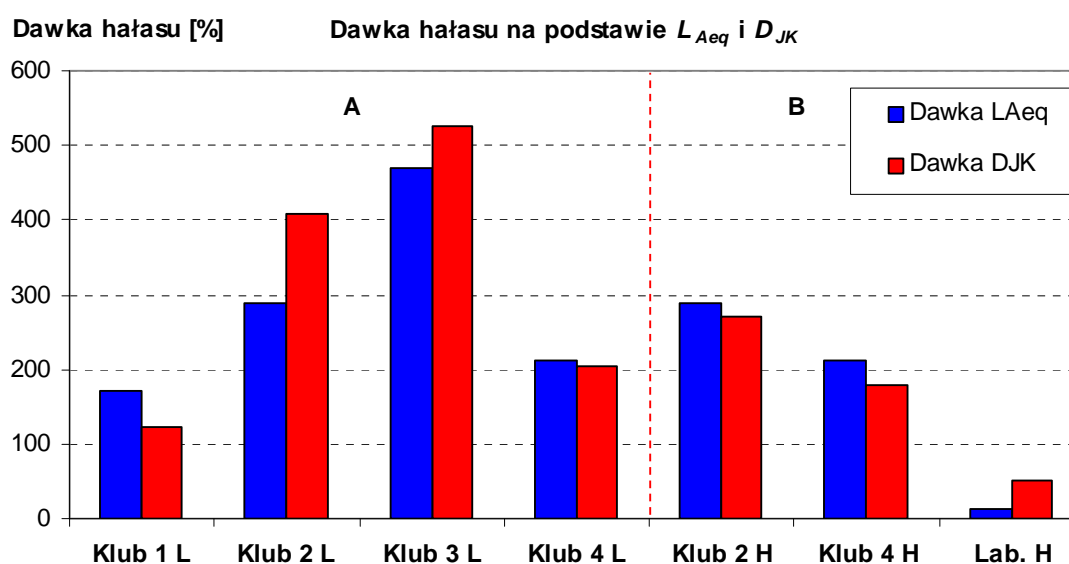
Rys. 7.22. Względna szkodliwość różnych rodzajów hałasów o tym samym poziomie równoważnym i czasie trwania

W tabeli 7.10 przedstawiono uzyskane wyniki wskaźnika L_{JK} dla sygnałów testowych oraz poziomów hałasu dla klubów muzycznych. Zestawiono wartości bezwzględne oraz, uwzględniając wartość referencyjną, obliczono wartości względne. Określają one stopień szkodliwości hałasu w stosunku do poziomu odniesienia. Uzyskane wartości zestawiono na wykresie z rys. 7.23 z dzienną dawką hałasu, odpowiadającą poszczególnym sygnałom, wyznaczoną za pomocą klasycznej metody w oparciu o poziom L_{Aeq} .

Tabela 7.10. Wartości bezwzględne i względne wskaźnika szkodliwości hałasu L_{JK}

Wsk.	Klub 1 L	Klub 2 L	Klub 3 L	Klub 4 L	Klub 2 H	Klub 4 H	Lab. H
L_{JK}	4740	15696	20215	7851	10453	6836	1923
D_{JK} [%]	123	408	525	204	272	178	50
DL_{Aeq} [%]	170	289	470	212	289	212	13

Na wykresie z rys. 7.23 przedstawiono dwa typy wyników. Grupa oznaczona symbolem A, to wartości uzyskane dla klubów w oparciu o poziomy równoważne w pasmach krytycznych dla całego przedziału czasu ekspozycji. Grupę B stanowią wartości uzyskane dla wybranych klubów oraz ekspozycji w warunkach laboratoryjnych, uzyskane w oparciu o historię równoważnych poziomów hałasu w pasmach krytycznych wyznaczonych w 1-minutowych przedziałach czasu.



Rys. 7.23. Zestawienie uzyskanych wartości dawek hałasu wyznaczonych w oparciu o wskaźnik L_{JK} w porównaniu z dzienną dawką hałasu wyznaczoną w oparciu o poziom równoważny

Wyniki uzyskane za pomocą wskaźnika D_{JK} są zbliżone do dawki hałasu wyznaczonej w oparciu o wartość poziomu równoważnego L_{Aeq} . Największe rozbieżności wystąpiły dla klubów 2, 1 i 3, dla wyników z grupy A. W przypadku wyników z grupy B rozbieżności dla klubu 2 są znacznie mniejsze. Duża zgodność uzyskanych wyników jest naturalną konsekwencją tego, że do wyznaczenia dawki szkodliwości hałasu wyrażonej wartością wskaźnika D_{JK} , jaką wywołuje ekspozycja na hałas, jest sygnał odniesienia, którego widmo jest zbliżone do widma szumu brązowego. Jak to zostało przedstawione wcześniej na rys. 7.21 widma hałasów dla rozpatrywanych klubów mają rozkład zbliżony do szumu brązowego. Dla sygnałów o innej charakterystyce widmowej (o charakterze np. zbliżonej do szumu różowego lub białego) wartości dawki hałasu wyrażonej za pomocą wskaźnika D_{JK} znacząco różnią się od tych wyznaczonych w oparciu o poziom równoważny (rys 7.22). Jest to doskonale widoczne na przykładzie wyników uzyskanych dla ekspozycji w warunkach laboratoryjnych (sygnał o charakterze szumu białego).

Należy wyraźnie podkreślić, że zaproponowane wskaźniki stanowią ilustrację odmiennego podejścia do problemu zagrożenia hałasem. Położono w ich konstrukcji nacisk na określenie skutku, jaki wywołuje hałas u przeciętnego słuchacza wyrażony wystąpieniem efektu TTS. Jakkolwiek efekt TTS zależy od poziomu hałasu, sposób jego powstania i późniejsze zanikanie jest związane ze sposobem dostarczania energii akustycznej i osobniczo zróżnicowaną podatnością słuchu na uraz akustyczny.

Zastosowanie zaproponowanego wskaźnika może znacząco wzbogacić wiedzę o skutkach wywołanych przez ekspozycję na hałas. Zasadnicze znaczenie ma fakt, iż już w trakcie ekspozycji dostępna jest informacja o zagrożeniu hałasem i jego skutkach. Możliwe jest również przeprowadzenie analiz symulacyjnych z wykorzystaniem różnorodnych modelowych sygnałów, odzwierciedlających rzeczywiste narażenie na hałas w projektowanym środowisku akustycznym, np. w zakładach pracy, danym stanowisku pracy.

7.5.2. Procentowe uszkodzenie słuchu

Ubytek słuchu był do tej pory określany w decybelach. Odmienną reprezentacją ubytku słuchu jest wyrażenie go w wartościach procentowego ubytku słuchu. Przeliczenie wartości progu słyszenia dostępne w formie audiogramu na wartości wyrażone w procentach może być zrealizowane na wiele sposobów. W literaturze omawiającej to zagadnienie odnaleźć można wiele metod służących do wykonania

przeliczenia decybeli na procenty [61][99][160]. Celem tego przeliczenia jest najczęściej chęć wyrażenia, jaka jest wydolność słuchu, mówiąca o zdolności danej osoby do rozumienia mowy [210]. Reprezentacja ubytku słuchu wyrażona w procentach została opracowana również na potrzeby innych środowisk niż medyczne, np. prawników, ekonomistów [61][210]. Ogólnie można stwierdzić, że cechą wspólną tych metod jest obliczanie procentowego ubytku słuchu na podstawie wybranych częstotliwości audiometrycznych. Wybór częstotliwości został podyktowany ich znaczeniem w rozumieniu mowy. Najczęściej uwzględnia się: 500, 1000 i 2000 Hz. Trwałe ubytki na tych częstotliwościach o określonym poziomie są podstawą do stwierdzenia choroby zawodowej wywołanej hałasem. Niemniej jednak w innych metodach uwzględniane są również częstotliwości 3000, 4000, a nawet 6000 Hz [61].

Należy zaznaczyć, że wiele z przytoczonych metod zakłada, że z ubytkiem słuchu ma się do czynienia, gdy próg słyszenia na wymienionych częstotliwościach przekracza wartość progową, którą w przypadku metod wymienionych w [61] jest najczęściej 25 dB HL.

W metodzie przytoczonej przez Puzynę [160] przyjęto założenie, że nawet nieznaczny ubytek (5 dB HL) może być uwzględniony w obliczaniu procentowego ubytku słuchu. Autor zaznacza, że metoda ta nie jest zbyt dokładna w rozumieniu szacowania procentowego uszczerbku w zakresie rozumienia mowy (w Polsce powszechnie stosowano metodę opracowaną przez Radę Terapii Fizykalnej Amerykańskiego Towarzystwa Lekarskiego (CPT – *Council of Physical Therapy*) [210]). Ze względu jednak na fakt, iż uwzględnia również małe ubytki słuchu, została użyta do wyznaczenia procentowego, chwilowego, uszczerbku słuchu. Należy w tym miejscu podkreślić, że zamiarem autora rozprawy była chęć sprawdzenia opracowanego dozymetru również pod kątem szacowania uszkodzenia słuchu wyrażonego w procentach. Autor niniejszej rozprawy ma świadomość, że współcześnie metoda ta nie ma większego zastosowania i ogólnie metody te są stosowane jedynie do rozpatrywania trwałych ubytków słuchu. Wybór tej metody został podyktowany tym, że uzyskane wartości przesunięcia progu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji są na tyle małe, że zastosowanie innych metod przeliczeniowych nie jest możliwe.

Uzyskane wyniki zostały przedstawione w tabeli 7.11. Kolorem czerwonym wyróżniono wyniki uzyskane dla ekspozycji w klubie 2 i 4. Dane te wyróżniono ze względu na fakt, iż dla ekspozycji w tych klubach możliwe było przeprowadzenie dwóch symulacji, dla wyników estymowanych za pomocą poziomu równoważnego za

cały czas ekspozycji oraz za pomocą historii zmian poziomu równoważnego, wyznaczonego dla przedziałów jednominutowych.

Tabela 7.11. Oszacowanie stopnia ubytku słuchu wyrażonego w procentach za pomocą metody Puzyny [160]

Rodzaj estymacji	Rodzaj ekspozycji	Częstotliwość [Hz]				Ubytek przeliczeniowy [%]	Błąd oszacowania (ΔU_p) [%]
		500	1000	2000	4000		
Pomiar audiometr.	Klub 1	---	0,2	2,9	1,7	4,7	---
	Klub 2	---	1,6	3,2	2,0	6,8	---
	Klub 3	---	1,1	4,1	2,4	7,5	---
	Klub 4	---	1,3	3,6	2,1	7,0	---
Symulacja pierwsza	Klub 1	---	1,0	3,2	1,3	5,5	-16,2
	Klub 2	---	1,4	4,1	2,1	7,6	-11,9
	Klub 3	---	2,1	4,6	2,2	8,9	-17,8
	Klub 4	---	1,0	2,1	1,7	4,8	31,5
Symulacja druga	Klub 2	---	1,3	3,5	1,7	6,5	3,9
	Klub 4	---	1,5	2,8	2,1	6,4	7,7

Przeprowadzona analiza ma jedynie charakter pogładowy. Wynika to z faktu, iż przytoczone metody obliczeniowe stosuje się do wyników badania audiometrycznego konkretnej osoby, a uzyskiwany wynik uwzględnia stan obu uszu. W przedstawionych obliczeniach przyjęto szereg uproszczeń. Przede wszystkim przeprowadzono obliczenia dla jednego ucha (można to założenie również interpretować jako przyjęcie, że ubytek słuchu ma charakter symetryczny). Dużym, istotnym założeniem jest to, że analizowane wartości odzwierciedlają jedynie przesunięcie progu słyszenia. W rzeczywistości jednak, każda osoba posiada inny przebieg „spoczynkowego” progu słyszenia. W konkretnych przypadkach wyznaczone wartości wyrażone w % mogłyby być większe. Mając na uwadze te ograniczenia i znając ich konsekwencje można przystąpić do interpretacji uzyskanych wyników. Oceny poprawności uzyskanego oszacowania dokonano według wzoru 7.15, na podstawie obliczonego błędu oszacowania wyrażonego w % w odniesieniu do wyników uzyskanych dla pomiarów audiometrycznych.

$$\Delta U_p = \frac{U_{pA} - U_{pPDH}}{U_{pA}} \cdot 100\% \quad (7.15)$$

gdzie:

ΔU_p – wynikowy błąd oszacowania ubytku przeliczeniowego wyrażony w %,

U_{pA} – ubytek przeliczeniowy wyrażony w %, wyznaczony na podstawie wyników audiometrycznych,

U_{pPDH} – ubytek przeliczeniowy wyrażony w %, wyznaczony za pomocą algorytmu PDH.

Znak dodatni oznacza, że estymowana wartość uzyskana za pomocą algorytmu PDH jest o mniejsza od pomiarów audiometrycznych, a wartość ujemna oznacza, że za pomocą algorytmu PDH uzyskano wartość większą od wyników audiometrycznych. Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że w ogólności wyniki ubytku przeliczeniowego wyrażonego w %, obliczone w oparciu o opracowany algorytm PDH są zgodne z wartościami wyznaczonymi na podstawie pomiarów audiometrycznych. Dla symulacji pierwszej (przeprowadzonej w oparciu o wartości równoważne za cały czas ekspozycji) uzyskane wartości ubytku przeliczeniowego są wyższe niż otrzymane na podstawie pomiarów audiometrycznych. Wyjątek stanowi wynik dla ekspozycji w klubie 4, dla którego odnotowano również największy błąd oszacowania. Wartości błędów oszacowania dla symulacji pierwszej wynikają głównie z zastosowanej metodyki działania algorytmu PDH. Obliczenie przesunięcia progów słyszenia w oparciu o poziom równoważny dla rozpatrywanych rodzajów ekspozycji jest znacznym uproszczeniem i daje jedynie orientacyjne wyniki (patrz rozdział 7.5).

Uwzględnienie historii zmian poziomu hałasu prowadzi do znacznie dokładniejszego wyznaczenia skutków słuchowych. Takie podejście znalazło potwierdzenie w uzyskanych wynikach błędu oszacowania dla symulacji drugiej. W tym przypadku odnotowano znaczący spadek błędu oszacowania. Dla klubu 2 błąd ten wyniósł zaledwie 3,9%, a dla klubu 4 wyniósł 7,7%. Oznacza to, że obliczony ubytek przeliczeniowy dla tych ekspozycji w oparciu o estymowany przebieg wartości TTS na podstawie historii zmian poziomu równoważnego jest porównywalny z wynikami uzyskanymi dla pomiarów audiometrycznych (wartości wyłuszczone w tabeli 7.11).

Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono koncepcję psychoakustycznej dozymetrii hałasowej, opracowaną przez autora niniejszej rozprawy doktorskiej. Obejmuje ona algorytm umożliwiający wyznaczanie skutków słuchowych wywołanych przez ekspozycję na hałas.

Zaproponowano ponadto nowe wskaźniki oceny szkodliwości hałasu, umożliwiające wyznaczenie skumulowanych skutków wywołanych nadmierną ekspozycją. Przedstawiono sposób doboru sygnału referencyjnego dla wyznaczenia dopuszczalnej dawki hałasu w oparciu o zaproponowane wskaźniki. Algorytm PDH posiada funkcjonalność umożliwiającą wyznaczanie opracowanych wskaźników bezpośrednio w czasie trwania ekspozycji. Dodatkowo wyznaczane są uzupełniające wskaźniki, takie jak: maksymalne przesunięcie progu słyszenia oraz estymowany czas powrotu słuchu do stanu sprzed ekspozycji.

Opracowany algorytm oraz zaproponowane wskaźniki zostały gruntownie przebadane w oparciu o rzeczywiste pomiary w warunkach narażeń (kluby) oraz za pomocą sygnałów testowych (szumy). Uzyskano wysoką zgodność obliczonych wyników z wartościami pochodzącymi z rzeczywistych pomiarów (audiometria, dozymetria). Dodatkowo potwierdzono słusność działania psychoakustycznego dozymetru hałasowego w oparciu o ubytek przeliczeniowy wyrażony w %.

Wszystkie te elementy tworzą nową metodę oceny szkodliwości hałasu, która może w istotny sposób uzupełnić obecne stosowane sposoby oceny szkodliwego wpływu hałasu na słuch. W świetle przytoczonych argumentów można stwierdzić, że udowodniono tezę drugą rozprawy:

Zaproponowane w rozprawie wskaźniki oceny zagrożeń hałasem prawidłowo odzwierciedlają wpływ hałasu na ryzyko wystąpienia uszkodzeń słuchu powodowanych długotrwałą ekspozycją.

Ponadto, ugruntowano również dowód tezy pierwszej poprzez szeroko zakrojoną weryfikację.

8. WNIOSKI

Głównym celem niniejszej rozprawy było opracowanie nowego sposobu oceny szkodliwego oddziaływania hałasu na słuch. Autor niniejszej rozprawy osiągnął ten cel z jednej strony przez analizę literatury w zakresie badań skutków oddziaływania hałasu na narząd słuchu w różnych warunkach akustycznych, z drugiej zaś przez przeprowadzenie licznych badań skutków słuchowych hałasu. Wzięto pod uwagę różnorodne rodzaje ekspozycji na wysokie poziomy dźwięku, które mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia osób ekspozowanych na hałas.

Zaproponowana metoda stanowi odmienne podejście do problemu dozymetrii hałasowej i sposobu wyznaczania dawki hałasu. W odróżnieniu do obecnie stosowanych metod opartych na pomiarze energii akustycznej dostarczonej do narządu słuchu, zastosowano podejście, w którym uwzględnia się skutek fizjologiczny, jaki hałas wywołuje w narządzie słuchu. Zadanie to osiągnięto przez wykorzystanie wiedzy z zakresu budowy i działania narządu słuchu oraz opisu matematycznego procesów wywołanych przez oddziaływanie hałasu. Opracowane algorytmy określania stopnia szkodliwego oddziaływania hałasu na słuch zostały zaimplementowane w opracowanej stacji monitorującej i działają w czasie rzeczywistym. Stacja monitorująca stanowi istotny element Multimedialnego Systemu Monitorowania Hałas. Stanowi on platformę do gromadzenia i przetwarzania wyników pomiarów hałasu, które mogą być prowadzone zarówno na terenie aglomeracji miejskiej, jak również na dowolnym stanowisku pracy lub pomieszczeniu zamkniętym, w którym występuje niebezpieczeństwo szkodliwego oddziaływania hałasu na słuch. System pozwala na określanie skutków słuchowych hałasu w trakcie trwania ekspozycji. Dowodzi to słuszności tezy pierwszej postawionej w niniejszej rozprawie:

Opracowany system teleinformatyczny pozwala na efektywne gromadzenie i przetwarzanie danych dotyczących zagrożeń hałasem poprzez określanie skutków słuchowych hałasu w trakcie trwania ekspozycji.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że zaproponowane w rozprawie wskaźniki poprawnie określają ryzyko wystąpienia uszkodzeń słuchu

powodowanych długotrwałą ekspozycją. Dowodzi to słuszności tezy drugiej postawionej w niniejszej rozprawie:

Zaproponowane w rozprawie wskaźniki oceny zagrożeń hałasem prawidłowo odzwierciedlają wpływ hałasu na ryzyko wystąpienia uszkodzeń słuchu powodowanych długotrwałą ekspozycją.

Multimedialny System Monitorowania Hałasu w toku realizacji niniejszej rozprawy został uzupełniony o wyznaczenie dodatkowych parametrów środowiska aglomeracji miejskiej. Dzięki temu została stworzona nowatorska i elastyczna platforma teleinformatyczna do prowadzenia złożonych analiz stanu środowiska aglomeracji miejskiej. Opracowany Psychoakustyczny Dozymetr Hałasowy, dzięki nowemu podejściu do problemu szkodliwego oddziaływania hałasu na słuch oraz wyznaczeniu wielu dodatkowych parametrów, posiada funkcjonalność o dużym znaczeniu praktycznym w zakresie profilaktyki chorób słuchu wywołanych nadmierną ekspozycją na hałas.

Upowszechnienie wyników badań oraz wdrożenie do stosowania w praktyce opracowanych rozwiązań może przyczynić się do zwiększenia świadomości szkodliwego oddziaływania hałasu na słuch wśród społeczeństwa, a dzięki temu możliwe jest osiągnięcie długofalowej poprawy w zakresie zmniejszenia występowania chorób słuchu wywołanych hałasem. Osiągnięty zostanie zatem nadrzędny cel, który został postawiony we wprowadzeniu do niniejszej rozprawy oraz stanowił główną motywację do podjętych prac.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] A Report on the Aircraft Noise as a Public Health Problem in Okinawa, March 1999 <http://www.asahikawa-med.ac.jp/igakubu/hygiene/okinawa/report-e.html>
- [2] Abbas P. J., Electrophysiology of the auditory system, *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, vol. 9, no. 1, 1-31, 1988.
- [3] Ahmed H. O., Dennis J. H., Badran O., Ismail M., Ballal S. G., Ashoor A., Jerwood D., High-frequency (10-18 kHz) hearing thresholds: reliability, and effects of age and occupational noise exposure, *Occup. Med.*, vol. 51, no. 4, 245-258, 2001.
- [4] Ahroon W. A., Hamernik R. P. and Davis R. I., Complex noise exposures: An energy analysis, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 2, 997-1006, 1993.
- [5] Ahroon W. A., Hamernik R. P., The effects of interrupted noise exposures on the noise-damaged cochlea, *Hearing Research*, vol. 143, 103-109, 2000.
- [6] Airo E., Olkinuora P., Toppila E., Järvinen A., Savolainen A., Noise exposure of broadcast production personnel, Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Mariehamn, Åland, 8-10 June, 2004.
- [7] Alves-Pereira M., Castelo Branco N. A. A., Public health and noise exposure: the importance of low frequency noise, INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY, 28-31.08.2007.
- [8] American Academy of Audiology, Position Statement, Preventing Noise-Induced Occupational Hearing Loss, October, 2003.
- [9] American Academy of Pediatrics, Committee on Environmental Health, Noise: A Hazard for the Fetus and Newborn, *Pediatrics*, vol. 100, no. 4, 724-727, 1997.
- [10] Aranda de Toro M. A., Ordoñez R., Hammershøi D., Distortion product otoacoustic emission (DPOAE) recovery after moderate sound exposure as a function of time, INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6.12.2006.
- [11] Balatsouras D. G., Homsoglou E., Danielidis V., Extended high-frequency audiometry in patients with acoustic trauma, *Clin. Otolaryngol.*, vol. 30, 249-254, 2005.

- [12] Balatsouras D. G., Tsimpiris N., Korres S., Karapantzos I., Papadimitriou N., Danielidis V., The effect of impulse noise on distortion product otoacoustic emissions, *International Journal of Audiology*, vol. 44, 540-549, 2005.
- [13] Bies D. A., Hansen C. H., An alternative mathematical description of the relationship between noise exposure and hearing loss, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 88, no. 6, 2743-2754, 1990.
- [14] Boettcher F. A., Schmiedt R. A., Distortion-product otoacoustic emissions in Mongolian gerbils with resistance to noise-induced hearing loss, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, no. 6, 3215-3222, 1995.
- [15] Bogoch I. I., House R. A., Kudla I., Perceptions About Hearing Protection and Noise-induced Hearing Loss of Attendees of Rock Concerts, *Canadian Journal of Public Health*. vol. 96, no. 1, 2005.
- [16] Borg E., Engstrom B., Noise level, inner hair cell damage, audiometric features and equal-energy hypothesis, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, no. 5, 1776-1782, 1989.
- [17] Bray A., Szymański M., Mills R., Noise induced hearing loss in dance music disc jockeys and an examination of sound levels in nightclubs, *Journal of Laryngology & Otology*, vol. 118, 123-128, 2004.
- [18] Bronsztejn I. N., Siemiendajew K. A., *Matematyka Poradnik encyklopedyczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004r.
- [19] Burdick C. K., Patterson J. H., Mozo B. T., Camp R. T., Threshold shifts in chinchillas exposed to octave bands of noise centered at 63 and 1000 Hz for three days, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, no. 2, 458-466, 1978.
- [20] Cadna/A, <http://www.datakustik.de>
- [21] Cave Ch. R., *Perceptual Modelling for Low-Rate Audio Coding*, Department of Electrical & Computer Engineering, McGill University, Montreal, Canada, June, 2002.
- [22] Celik O., Yalcın S., Ozturk A., Hearing parameters in noise exposed industrial workers, *Auris Nasus Larynx*, vol. 25, 369-375, 1998.
- [23] Chen G.-D., Fechter L. D., The relationship between noise-induced hearing loss and hair cell loss in rats, *Hearing Research*, vol. 177, 81-90, 2003.
- [24] Chen T.-H., Fan C.-F., Wang M.-J., Chiu M.-C., The effects of noise intensity and frequency on physiological measures and subjective responses, *INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY, 28-31.08.2007*.

- [25] Chung J. H., Des Roches C. M., Meunier J., and Eavey R. D., Evaluation of Noise-Induced Hearing Loss in Young People Using a Web-Based Survey Technique, *Pediatrics*, vol. 115, no. 4, 2005.
- [26] Ciarkowski A., Kulesza M., Zastosowanie kontrolerów strumieniowych USB do budowy dedykowanych interfejsów dźwiękowych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, no. 20, 17 - 22, 2004.
- [27] Clark W. W., Bohne B. A., Boettcher F. A., Effect of periodic rest on hearing loss and cochlear damage following exposure to noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 82, no. 4, 1253-1264, 1987.
- [28] Clark W. W., Noise exposure from leisure activities: A review, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 1, 175-181, 1991.
- [29] Clark W. W., Recent studies of temporary threshold shift (TTS) and permanent threshold shift (PTS) in animals, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 1, 155-163, 1991.
- [30] Coles R. R. A., Lutman M. E., Buffin J. T., Guidelines on the diagnosis of noise-induced hearing loss for medicolegal purposes, *Clin. Otolaryngol.*, vol. 25, 264-273, 2000.
- [31] Committee Report, Occupational Noise-Inducted Hearing Loss, *J. Occup. Med.*, vol. 31, no. 12, 1989.
- [32] Concha-Barrientos M., Campbell-Lendrum D., Steenland K., Occupational noise, Assessing the burden of disease from work-impairment at national and local levels, World Health Organization, Protection of the Human Environment, Geneva, 2004.
- [33] Criteria for a recommended standard, Occupational Noise Exposure, U.S. Department of Health and Human Services, June, 1998.
- [34] Czerwiński J., Dostosowanie prawa polskiego z zakresu hałasu do przepisów Unii Europejskiej – nowa ustawa o Ochronie Środowiska, Departament Ochrony Środowiska, Ministerstwo Środowiska. Pełna treść opracowania dostępna pod adresem: <http://www.rcie.lodz.pl/docs/halas1.doc>
- [35] Czyżewski A., Kostek B., Kotus J., Zastosowanie środków teleinformatycznych do diagnostyki zagrożeń hałasowych i chorób słuchu Część II – Multimedialny system monitorowania hałasu; *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, no. 8-9, 330-337, 2004.

- [36] Czyżewski A., Kostek B., Skarżyński H., Computer technology for audiology, phoniatriy and speech therapy. 312-313, Academic Press - EXIT, Warszawa 2002.
- [37] Czyżewski A., Kotus J., Diagnostyka słuchu i zagrożeń hałasowych, VI Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Diagnostyka Procesów Przemysłowych, DPP'03 Władysławowo k/Gdańska, 15-17 września, 2003.
- [38] Czyżewski A., Kotus J., Kostek B., Application of the psychoacoustic noise dosimeter for the determination of noise impact on hearing, INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY, 28-31.08.2007.
- [39] Czyżewski A., Kotus J., Kostek B., Comparing Noise Levels and Audiometric Testing Results Employing IT Based Diagnostic Systems, 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering INTERNOISE 2004, Prague, Czech Republic, 22.8.2004-24.8.2004.
- [40] Czyżewski A., Kotus J., Kostek B., Kochanek K., Skarżyński H., IT- Enabled Comparison of Environmental Noise Levels and Noise-Evoked Hearing Impairments; *Mechanika*, vol. 23, no. 2, 143-154, 2004.
- [41] Czyżewski A., Kotus J., Kostek B., Szczodrak M., Multimedialny System Monitorowania Hałasu, *Bezpieczeństwo Pracy*, nr 7-8, 8 - 11, 2007.
- [42] Czyżewski A., Kotus J., Kulesza M., Project and development of the automatic station for environmental noise monitoring; Projekt i realizacja automatycznej stacji monitorowania hałasu środowiskowego, XI Międzynarodowe Sympozjum Reżyserii i Inżynierii Dźwięku i Obrazu, 53 - 60, Kraków, Polska, 23.6.2005-25.6.2005.
- [43] Davis B., Qiu W., Hamernik R. P., The use of distortion product otoacoustic emissions in the estimation of hearing and sensory cell loss in noise-damaged cochleas, *Hearing Research*, vol. 187, 12-24, 2004.
- [44] Dobrucki A., *Przetworniki elektroakustyczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [45] Dunn D. E., Davis R. R., Merry C. J. and Franks J. R., Hearing loss in the chinchilla from impact and continuous noise exposure, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 4, 1979-1985, 1991.
- [46] Dyrektywa UE w sprawie zbierania i obróbki danych z zakresu hałasu środowiskowego, Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council.

- [47] Eleftheriou P. C., Industrial noise and its effects on human hearing, *Applied Acoustics*, vol. 63, 35-42, 2002.
- [48] Emmerich E. at all; Effects of industrial noise exposure on distortion product otoacoustic emissions (DPOAEs) and hair cell loss of the cochlea - long term experiments in awake guinea pigs; *Hearing Research*, vol. 148, 9-17, 2000.
- [49] Emmerich E., Richter F., Linss V., Linss W., Frequency-specific cochlear damage in guinea pig after exposure to different types of realistic industrial noise, *Hearing Research*, vol. 201, 90–98, 2005.
- [50] Engdahl B., Kemp D. T., The effect of noise exposure on the details of distortion product otoacoustic emissions in humans, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, no. 3, 1573-1587, 1996.
- [51] Engel Z. W., Sadowski J., et al., Noise protection in Poland in European Legislation, The Committee on Acoustics of the Polish Academy of Science & CIOP-PIB, Warsaw, 2005.
- [52] Engel Z., Zwalczenie hałas na świecie i w Polsce, *Otwarte Seminarium z Akustyki*, Szczyrk-Gliwice, 58-64, 23-27.09.2003.
- [53] Environmental Noise, Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, 2000.
- [54] Extensible Markup Language (XML), <http://pl.wikipedia.org/wiki/XML>
- [55] Fastl H, Zwicker E., *Psychoacoustics - Facts and Models*, Springer, Third Edition, 2006.
- [56] Fearn R. W., Hearing loss in musicians, *J. of Sound and Vibration*, vol. 163, 372-378, 1993.
- [57] Fearn R. W., Serial audiometry in young subjects aged 11-25 years exposed to amplified music, *J. of Sound and Vibration*, vol. 150, 350-355, 1991.
- [58] Fligor B. J. and Cox L. C., Levels of Commercially Available Portable Compact Disc Players and the Potential Risk to Hearing, *Ear & Hearing*, vol. 25, no. 6, 513-527, 2004.
- [59] Fridberger A., Zheng J., Parthasarathi A., Ren T., Nuttall A., Loud Sound-Induced Changes in Cochlear Mechanics, *J Neurophysiol*, vol. 88, 2002.
- [60] Future Noise Policy. European Commission Green Paper. Brussels, 04.11.1996, COM(96) 540 Final).
- [61] Gelfand S. A.: *Essentials of Audiology*, Thieme Medical, Publishers, Inc., New York, Stuttgart 1997.

- [62] Gouveris H., Mann W., Increased Amplitudes of Distortion Product Otoacoustic Emissions in Patients with Unilateral Acoustic Neuroma, *ORL*, vol. 66, 302–305, 2004.
- [63] Grabkowski M., Opracowanie i uruchomienie oprogramowania do automatycznego tworzenia map hałasu w wykorzystaniem programu CadnaA, Raport wewnętrzny z realizacji pracy badawczo-wdrożeniowej Katedry Systemów Multimedialnych PG, 20.09.2007r. (materiały niepublikowane)
- [64] Grenner J., Nilsson P., Katbamna B., AP threshold elevation in the guinea pig following exposure to a broadband noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, no. 6, 2223-2228, 1989.
- [65] Groothoff B., Morrison I., Harmer K., What Was That Again? An Assessment of Potential Noise Induced Hearing Loss at Queensland Conservatorium, *INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY, 28-31.08.2007*.
- [66] Haller A. K., Montgomery J. K., Noise-Induced Hearing Loss in Children, *Teaching Exceptional Children*, vol. 36, no. 4, 22-27, 2004.
- [67] Hamernik R. P., Ahroon W. A., Hsueh K. D., Lei S.-F., and Davis R. I., Audiometric and histological differences between the effects of continuous and impulsive noise exposures, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 4, 2088-2095, 1993.
- [68] Hamernik R. P., Patterson J. H., Salvi R. J., The effect of impulse intensity and the number of impulses on hearing and cochlear pathology in the chinchilla, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 81, no. 4, 1987.
- [69] Hamernik R. P., Qiu W., and Davis B., The effects of the amplitude distribution of equal energy exposures on noise-induced hearing loss: The kurtosis metric, *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 114, no.1, 2003.
- [70] Hammershøi D., Ordóñez R., Reuter K., Hearing damage by personal stereo: A literature review, *INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6.12.2006*.
- [71] Harding G. W., Bohne B. A., Noise-induced hair-cell loss and total exposure energy: Analysis of a large data set, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 5, Part 1, 2004.
- [72] Heffner H. E., Harrington I. A., Tinnitus in hamsters following exposure to intense sound, *Hearing Research*, vol. 170, 83-95, 2002.
- [73] Heinonen-Guzejev M., Vuorinen H. S., Kaprio J., Heikkilä K., Mussalo-Rauhamaa H., Self-report of transportation noise exposure, annoyance and noise

- sensitivity in relation to noise map information, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 234, no. 2, 191-206, 2000.
- [74] Henderson D., Hamernik R.P., Impulse noise: Critical review, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 80, no. 2, 569-584, 1986.
- [75] Hoffmann E., Auditory disorders among dance club visitors, INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6.12.2006.
- [76] Holgers K. M., Tinnitus in 7-year-old children, *Eur. J. Pediatr.*, vol. 162, 276-278, 2003.
- [77] Hornsby B. W. Y., Ricketts T. A., The effects of hearing loss on the contribution of high- and low- frequency speech information to speech understanding, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 3, 1706-1717, 2003.
- [78] <http://www.gios.gov.pl/halas/2.pdf>
- [79] <http://www.mediacollege.com/audio/noise/>
- [80] <http://www.poznan.pios.gov.pl/glowna/art.php?nr=64>
- [81] http://www.stat.gov.pl/dane_spol-gosp/praca_ludnosc/warunki_pracy/2005/index.htm
- [82] Humes L. E., Walt Jesteadt, Modeling the interactions between noise exposure and other variables, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 1, 182-188, 1991.
- [83] IMMI, <http://woelfel.de>
- [84] Ingle S.T., Pachpande B.G., Wagh N.D., Attarde S.B., Noise exposure and hearing loss among the traffic policemen working at busy streets of Jalgaon urban centre, *Transportation Research, Part D*, vol. 10, 69-75, 2005.
- [85] Irle H., Hesse J. M., Strasser H., Physiological cost of energy-equivalent noise exposures with a rating level of 85 dB(A): Hearing threshold shifts associated with energetically negligible continuous and impulse noise, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 21, 451-463, 1998.
- [86] Jaroszewski A., Zagrożenia słuchu, Kształtowanie i percepcja sekwencji dźwięków muzycznych, *Wydawnictwo Akademii Muzycznej im. F. Chopina, Warszawa*, str. 291-30, 2002.
- [87] Jaroszewski A., Fidecki T., Rogowski P., Exposures and hearing thresholds in music students due to training sessions, *Archives of Acoustics*, vol. 24, no. 2, 111-118, 1999.
- [88] Jaroszewski A., Fidecki T., Rogowski P., Hearing damage from exposure to music, *Archives of Acoustics*, vol. 23, no. 1, 3-24, 1998.

- [89] Jaroszewski A., Jaroszevska A., Impulsiveness of discotheque exposures, *Archives of Acoustics*, vol. 25, no. 3, 275-281, 2000.
- [90] Jaroszewski A., Rogowski P., Rakowski A., Sound pressure levels in emission of percussion instruments during training sessions, *Archives of Acoustics*, vol. 25, no. 3, 283-289, 2000.
- [91] Jaroszewski A., The extent of hearing damage from exposures to music. *Noise and Vibration Worldwide*, vol. 31, 14-25, 2000.
- [92] Job A, Cian C, Esquivié D, Leiffen D, Trousselard M, Charles C, Nottet JB., Moderate variations of mood/emotional states related to alterations in cochlear otoacoustic emissions and tinnitus onset in young normal hearing subjects exposed to gun impulse noise, *Hearing Research*, vol. 1931, 31-38, 2004.
- [93] Job R. F. S., The influence of subjective reactions to noise on health effects of the noise, *Environment International*, vol. 22, no. 1, 93-104, 1996.
- [94] Johnston J. D., Transform Coding of Audio Signals Using Perceptual Noise Criteria. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 62, 314-323, 1988.
- [95] Kabuto M., Suzuki S., Temporary threshold shift from transportation noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, no. 1, 1979.
- [96] Kaczmarek A., Mikulski W., Augustyńska D., Ocena ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas na niestacjonarnych stanowiskach pracy, *Bezpieczeństwo Pracy*, nr 9, 2002.
- [97] Kalendarz profilaktycznych badań słuchu u dzieci zalecany przez Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, *Słyszę*, 4-8, Maj 2000.
- [98] Kardous C. A., Willson R. D., Murphy W. J., Noise dosimeter for monitoring exposure to impulse noise, *Applied Acoustics*, vol. 66, 974-985, 2005.
- [99] Kavanagh K. T., Evaluation of Hearing Handicaps and Presbycusis Using World Wide Web-Based Calculators, *J. Am. Acad. Audiol.*, vol. 12, 497-505, 2001.
- [100] Keefe J., Noise exposure associated with marching and pep bands: measurements, assessment of risks, and possible solutions, Dewey Lawson, Duke University Department of Physics, <http://www.duke.edu/~jak21/>
- [101] Kemp D. T., Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use, *British Medical Bulletin*, vol. 63, 223-241, 2002.

- [102] Kluijver H. and Stoter J., Noise mapping and GIS: optimising quality and efficiency of noise effect studies, *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 27, 85-102, 2003.
- [103] Körpert K., Tinnitus in an occupationally noise exposed population, *INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY*, 28-31.08.2007.
- [104] Kostek B., Czyżewski A., Budzyński G., Sankiewicz M., Whitehead G., Roland-Mieszkowski M., Sound exposure in the entertainment business, *J. Canadian Acoustics*, vol. 21, no. 3, 1993.
- [105] Kostek B., Kotus J., Czyżewski A., Noise Threat Impact on Hearing in Schools and Students' Music Clubs, *INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA*, 3-6.12.2006.
- [106] Koszarny Z., Goryński P., Exposure to noise of schoolchildren and teachers in school [in Polish], *Roczn. PZH*, vol. 41, no. 5-6, 297-310, 1990.
- [107] Koszarny Z., Jankowska D., Determination of acoustic climate inside elementary schools [in Polish], *Roczn. PZH*, vol. 46, no. 3, 305-314, 1995.
- [108] Kotus J., Multimedia System for Environmental Noise Monitoring, *Multimedialny System Monitorowania Hałasu Środowiskowego, EURONOISE 2006, Tampere, Finland*, 30.5.2006-1.6.2006.
- [109] Kotus J., Informacje o Multimedialnym Systemie Monitorowania Hałasu, 119 konwencja Audio Engineering Society w Nowym Yorku, 7-10.10.2005.
- [110] Kryter K. D., *The Effects of Noise on Man*, Academic Press, Inc., New York, 1970.
- [111] Kucharski R., Chyla A., Koszarny Z., Kraszewski M., Szymański Z., Sakowska P., Taras A., Stan klimatu akustycznego w kraju w świetle badań WIOŚ, praca zbiorowa, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2002 r.
- [112] Laroche C., Hetu R., Poirier S., The growth of and recovery from TTS in human subjects exposed to impact noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, no. 4, 1681-1690, 1989.
- [113] Lataye R. and Campo P., Applicability of the Leq as a damage-risk criterion: An animal experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, no. 3, 1621-1632, 1996.
- [114] Lei S.-F., Ahroon W. A., Hamerni R. P., The application of frequency and time domain kurtosis to the assessment of hazardous noise exposures, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 96, no. 3, 1435-1444, 1994.

- [115] Lerchera P., Soundscape Research, Quality of Life and Health: An Integrated Environmental Health Viewpoint, INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY, 28-31.08.2007.
- [116] LIMA, <http://www.stapelfeldt.de>
- [117] Lipowczan A., Mapy akustyczne, a technologia GIS, Zakład Akustyki Technicznej, Techniki Laserowej i Radiometrii, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, www.mapyakustyczne.pl
- [118] Löwe A.: Każde dziecko może nauczyć się słyszeć i mówić, Media Rodzina, Poznań, 1999.
- [119] Luz G. A., Hodge D. C., Recovery from Impulse-Noise Induced TTS in Monkeys and Men: A Descriptive Model, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49, no. 6, 1770-1777, 1971.
- [120] Magnus J., On noise and hearing loss Prevalence and reference data, Department of Neuroscience and Locomotion, Division of Technical Audiology, Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden Linköping, 2003.
- [121] Malchaire J., Piette A., A comprehensive strategy for the assessment of noise exposure and risk of hearing impairment, *Ann. occup. Hyg.*, vol. 41, no. 4, 467-484, 1997.
- [122] Malchaire J., Strategy for prevention and control of the risks due to noise, *Occup. Environ. Med.*, vol. 57, 361-369, 2000.
- [123] McBride D. I., Williams S., Audiometric Notch as a sign of noise induced hearing loss, *Occup. Environ. Med.*, vol. 58, 46-51, 2001.
- [124] Measuring Sound, Brüel&Kjær, 1984.
- [125] Melnick W., Human temporary threshold shift (TTS) and damage risk, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 1, 147-154, 1991.
- [126] Miedema H. M. E., Vos H., Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 3, 1492-1504, 2003.
- [127] Mills J. H., Adkins W. Y., Gilbert R. M., Temporary threshold shifts produced by wideband noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, no. 2, 1981.
- [128] Mills J. H., Gilbert R. M., and Adkins W. Y., Temporary threshold shifts in humans exposed to octave bands of noise for 16 to 24 hours, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 65, no. 5, 1238-1248, 1979.

- [129] Mirowska M., Subjective and objective methods of noise assessment in dwellings. Open Seminar on Acoustics, Jastrzębia Góra, 477-482, 15-18.09.1997.
- [130] MITHRA, <http://www.01db.com>
- [131] Miyakita T., Ueda A., Estimates of workers with noise-induced hearing loss and population at risk, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 205, no. 4, 441-449, 1997.
- [132] Moore B. C. J. and Glasberg B. R., A Model of Loudness Applicable to Time-Varying Sounds, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, 331-342, 2002.
- [133] Nakai Y., Noise-induced hearing loss IFOS NIHL Standing Committee's report and NIHL in Japan, *International Congress Series*, vol. 1240, 273- 275, 2003.
- [134] Neitzel R. and Seixas N., The Effectiveness of Hearing Protection Among Construction Workers, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 2, 227-238, 2005.
- [135] Neitzel R., Seixas N., Goldman B. and Daniell W., Contributions of Non-occupational Activities to Total Noise Exposure of Construction Workers, *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 48, no. 5, 463-473, 2004.
- [136] Neitzel R., Seixas N., Olson J., Daniell W., Goldman B., Nonoccupational noise: exposures associated with routine activities, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 1, 2004.
- [137] Niskar A. S., Kieszak S. M., Holmes A. E., Esteban E., Rubin C., Brody D. J., Estimated Prevalence of Noise-Induced Hearing Threshold Shifts Among Children 6 to 19 Years of Age: The Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988-1994, United States, *Pediatrics*, vol. 108, no. 1, 40-43, 2001.
- [138] Noise Abatement Policy in the European Union - working paper of the Directorate General for Research of the European Parliament. W-17, 5-1996.
- [139] Noise and Hearing Loss. NIH Consens Statement Online, Jan 22-24, vol. 8, no. 1, 1-24, 1990.
- [140] Nondahl D. M., Cruickshanks K. J., Wiley T.L., Klein B. E. K., Tweed T. S., Prevalence and 5-Year Incidence of Tinnitus among Older Adults: The Epidemiology of Hearing Loss Study, *J. Am. Acad. Audiol.*, vol 13, 323-331, 2002.

- [141] Nordstrom M. R., M.D., F.A.C.S. Hearing Loss: Recognizing, Preventing and Managing Claims, Otolaryngology-Head and Neck Surgery Ltd. Milwaukee, Wisconsin.
- [142] Oftedal G., Noise-induced hearing damage caused by metabolic exhaustion: A mathematical model, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 4, 1988.
- [143] Ordoñez R., Hammershøi D., Effects of frequency content from exposures with the same A-weighted equivalent level, INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6.12.2006.
- [144] Ordoñez R., Reuter K., Hammershøi D., A model of recovery for absolute thresholds and distortion product otoacoustic emissions after high level tonal exposures, INTER-NOISE 2004 Proceedings, Prague, Czech Republic, 22-25.08.2004.
- [145] Ordoñez R., Reuter K., Hammershøi D., Sound exposure by personal stereo, field study of young people in Denmark, INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6 December 2006.
- [146] Orfanidis S. J., Introduction to Signal Processing, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [147] Ouis D., Annoyance from road traffic noise: a review, *Journal of Environmental Psychology*, vol. 21, 101-120, 2001.
- [148] Palmer K. T., Coggon D., Syddall H. E., Pannett B., Griffin M. J., Occupational exposure to noise and hearing difficulties in Great Britain, Health & Safety Executive BOOKS, 2001.
- [149] Park M.-Y., Assessment of potential noise-induced hearing loss with commercial “Karaoke” noise; *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 31, 375-385, 2003.
- [150] Pawlaczyk-Łuszczynska M., Dudarewicz A., Bąk M., Fiszler M., Kotyło P., Śliwińska-Kowalska M., Temporary changes in hearing after exposure to shooting noise, *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, vol. 17, no. 2, 285-294, 2004.
- [151] Pawlas K., Audiometria w paśmie powyżej 8 kHz w profilaktyce uszkodzeń słuchu powodowanych przez hałas impulsowy, PROGRESS, Sosnowiec, 1995.
- [152] Pienkowski M. and Kunov H., Suppression of distortion product otoacoustic emissions and hearing threshold, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, no. 4, 2001.

- [153] Polska Norma PN-EN 61260:1995 (norma międzynarodowa IEC 1260:1995), Elektroakustyka, Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy, PKN, 2000.
- [154] Polska Norma PN-ISO 1996, (Cz. 1, 2, 3).
- [155] Polska Norma PN-N-01307 Hałas. Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.
- [156] Predictor, <http://www.bksv.com/bksv>
- [157] Price G. R., Implications of a critical level in the ear for assessment of noise hazard at high intensities, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69. no. 1, 171-177, 1981.
- [158] Price G. R., Kalb J. T., Insights into hazard from intense impulses from a mathematical model of the ear, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90. no. 1, 1991.
- [159] Projekt europejski <http://www.imagine-project.org/>
- [160] Puzyna Cz., Ochrona środowiska pracy przed hałasem, tom 1 i 2, WNT, Warszawa, 1981.
- [161] Ramowa strategia ograniczenia hałasu komunikacyjnego w Polsce, Zakład Akustyki Środowiska, pełna treść raportu dostępna jest pod adresem: http://www.mt.gov.pl/article/strategie_i_opracowania/raporty/
- [162] Randall R. B., Tech B., Frequency analysis, Brüel&Kjær, 1987.
- [163] Reeb-Whitaker C. K., Seixas N. S., Sheppard L., Neitzel R., Accuracy of task recall for epidemiological exposure assessment to construction noise, *Occup. Environ. Med.*, vol. 61, 135–142, 2004.
- [164] Renowski J., Hałasy i wibracje, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1976.
- [165] Renowski J., Hałasy. Wskaźniki i kryteria oceny, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1988.
- [166] Ricard J., Towards computational morphological description of sound, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, September, 2004.
- [167] Rintelmann W. F., Lindberg R. F., Smitley E. K., Temporary threshold shift and recovery patterns from two types of rock and roll music presentation, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 51, no. 4, 1249-1255, 1972.
- [168] Robinson D. J. M., Perceptual model for assessment of coded audio, Department of Electronic Systems Engineering, University of Essex, March, 2002.
- [169] Robles L., Ruggero M. A., Mechanics of the Mammalian Cochlea, *Physiological Reviews*, vol. 81, no. 3, 2001.

- [170] Rogowski P., Rościszewska T., Jaroszewski A., Sound reproduction levels in portable players used by pupils in Warsaw secondary schools, *Archives of Acoustics*, vol. 26, no. 1, 3-10, 2001.
- [171] Rosen E. J., Vrabec J. T., Noise Induced Hearing Loss, Grand Rounds Presentation, UTMB, Dept. of Otolaryngology, January 10, 2001.
- [172] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 20.04.2004 r. w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać mierniki poziomu dźwięku. *Dz. U. Nr 94, Poz. 915*.
- [173] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (*Dz. U. z dnia 5 lipca 2007 r.*)
- [174] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 października 2002 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać program ochrony środowiska przed hałasem (*Dz. U. z dnia 29 października 2002 r.*).
- [175] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 czerwca 2007 r. w sprawie ustalania wartości wskaźnika hałasu L_{DWN} (*Dz. U. z dnia 15 czerwca 2007 r.*).
- [176] Sabesky I. J., Korczyński R. E., Noise Exposure of Symphony Orchestra Musicians, *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 10, no. 2, 1995.
- [177] Sadowski J., *Podstawy akustyki urbanistycznej*, Arkady, Warszawa, 1982.
- [178] Salamon R., *Systemy hydrolokacyjne*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 2006.
- [179] Seixas N. et al., Alternative Metrics for Noise Exposure Among Construction Workers, *Ann Occup Hyg.*, vol. 49, 493-502, 2005.
- [180] Seixas N. S., Kujawa S. G., Norton S., Sheppard L., Neitzel R., Slee A., Predictors of hearing threshold levels and distortion product otoacoustic emissions among noise exposed young adults, *Occup. Environ. Med.*, vol. 61, 899-907, 2004.
- [181] Seixas N. S., Sheppard L., Neitzel R., Comparison of Task-Based Estimates With Full-Shift Measurements of Noise Exposure, *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 64, 823–829, 2003.
- [182] Shield B. M., Dockrell J. E., The effects of noise on children at school: a review, *J. Building Acoustics*, vol. 10, no. 2, 97-106, 2003.
- [183] Skarżynski H., Czyżewski A., Senderski A., Kochanek K., ‘‘I can hear’’: a system for universal hearing screening in school age children. Organization and first results. *International Congress Series*, 1240, 325- 327, 2003.

- [184] Smeatham D., Noise levels and noise exposure of workers in pubs and clubs-A review of the literature, Health & Safety Executive BOOKS, 2002.
- [185] Smurzyński J.: Podstawy badań otoemisji akustycznej, *Audiofonologia*, Tom VII, 5-19, 1995.
- [186] Solecki L., Preliminary evaluation of occupational hearing loss risk among private farmers, *Ann. Agric. Environ. Med.*, vol. 10, 211-215, 2003.
- [187] SoundPLAN, <http://www.soundplan.com>
- [188] Stepnowski A., *Systemy akustycznego monitoringu środowiska morskiego*, GTN, Gdańsk, 2001.
- [189] Strasser H., Chiu M.-C., Irle H., Grünig T., Threshold Shifts and Restitution of the Hearing After Energy-Equivalent Narrow-Band And Wide-Band Noise Exposures, INTER-NOISE 2007 Proceedings, ISTANBUL, TURKEY, 28-31.08.2007.
- [190] Strasser H., Irle H., Wagener A., Chiub M. C., Threshold shifts and restitution of the hearing after „House Music” – A comparison with two energy-equivalent classical music exposures, INTER-NOISE 2006 Proceedings, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6.12.2006.
- [191] Tambs K., Hoffman H. J., Borchgrevink H. M., Holmen J., Samuelsen S. O., Hearing loss induced by noise, ear infections, and head injuries: results from the Nord-Trøndelag Hearing Loss Study, *International Journal of Audiology*, vol. 42, 89–105, 2003.
- [192] Terhardt E., Stoll G., Seewann M., Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 71, 679-688, 1982.
- [193] The Canadian Association of Speech-Language Pathologists and Audiologists, Noise-Induced Hearing Loss Fact Sheet, www.caslpa.ca.
- [194] Toppila E., Pyykko I., Starck J., Age and noise-induced hearing loss, *Scand. Audiol.*, vol. 30, 236–244, 2001.
- [195] University of Washington Final Report: Noise and Hearing Loss in Construction September 2004.
- [196] Ustawa o ochronie i kształtowaniu środowiska z dnia 31 stycznia 1980 r. (Dz. U. 94.49.196).
- [197] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. - Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62, poz. 627, z późn. zm.).

- [198] Wake M., Poulakis Z., Slight and mild hearing loss in primary school children, *J. Paediatr. Child Health*, vol. 40, 11-13, 2004.
- [199] Ward W. D., Cushing E. M., Burns E. M., Effective quiet and moderate TTS: Implications for noise exposure standards, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol 59, no. 1, 1976.
- [200] Ward W. D., Glorig A., Sklar D. L., Temporary Threshold Shift from Octave-Band Noise: Applications to Damage-Risk Criteria, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 31, no. 4, 522-528, 1959.
- [201] Ward W. D., Temporary Threshold Shift and Damage-Risk Criteria for Intermittent Noise Exposures, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol 48, no. 2, Part 2, 1970.
- [202] Ward W. D., The role of intermittence in PTS, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 1, 164-169, 1991.
- [203] Williams W., Noise exposure levels from personal stereo use, *International Journal of Audiology*, vol. 44, 231-236, 2005.
- [204] Wpływ hałasu i wibracji na organizm człowieka. Pełna treść artykułu jest dostępna pod adresem: http://www.sciaga.pl/tekst/15760-16-wplyw_halasu_i_wibracji_na_organizm_czlowieka
- [205] Wszółek G., Badania mikrofonów pomiarowych i mierników poziomu dźwięku w polu swobodnym, Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Kraków, 2003.
- [206] www.nmea.org
- [207] Yaremchuk K., Dickson L., Burk K., Shivapuja B. G., Noise level analysis of commercially available toys, *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, vol. 41, 187-197, 1997.
- [208] Zacharek M. A., Kaltenbach J. A., Mathog T. A., Zhang J., Effects of cochlear ablation on noise induced hyperactivity in the hamster dorsal cochlear nucleus: implications for the origin of noise induced tinnitus, *Hearing Research*, vol. 172, 137-144, 2002.
- [209] Zagrożenie hałasem w środowisku pracy i życia. Konferencja prasowa inaugurująca kampanię informacyjną. STOP HAŁASOWI! Warszawa, kwiecień 2005 r.
- [210] ZARYS AUDIOLOGII KLINICZNEJ pod redakcją Antoniego Pruszevicza Wydanie II Wydawnictwo Akademii Medycznej im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, str. 375-376, str. 377-379.

- [211] Zhao F., Wada H., Koike T., Stephens D., The influence of middle ear disorders on otoacoustic emissions, *Clin. Otolaryngol.*, vol. 25, 3-8, 2000.
- [212] Zieliński R., Zieliński W., *Podręczne tablice statystyczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1987.
- [213] Zwicker E., Terhardt E., Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, no. 5, 1523-1525, 1980.

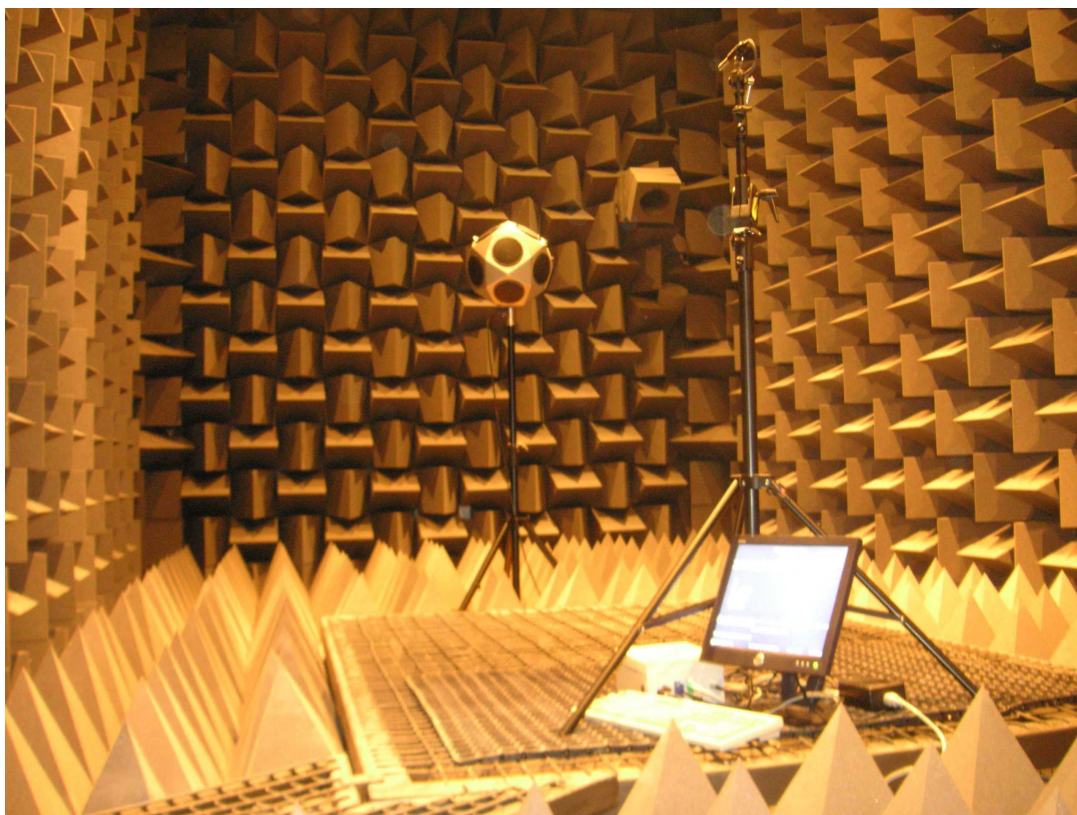
10. ZAŁĄCZNIKI

10.1. Załącznik 1

Badanie stacji pomiarowej

Badanie stacji pomiarowej (algorytmu realizującego funkcje miernika poziomu dźwięku) pod kątem zgodności z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 20 kwietnia 2004 r. w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać mierniki poziomu dźwięku [172]. Badania przeprowadzono w oparciu o:

- kompletny system pomiarowy (mikrofon, przedwzmacniacz, przetwornik A/C, oprogramowanie) w warunkach pola swobodnego, w komorze bezchowej Katedry Systemów Multimedialnych (rys. 1),
- część elektryczną (przedwzmacniacz, przetwornik A/C, oprogramowanie), z wykorzystaniem systemu TWO (zewnętrzny generator) po podłączeniu impedancji zastępczej mikrofonu,
- oprogramowanie z zastosowaniem cyfrowych sygnałów testowych.



Rys. 1. Pomiary kontrolne stacji monitorującej w komorze bezchowej

Przeprowadzenie licznych testów i analiz umożliwiło wszechstronne sprawdzenie poprawności działania opracowanej stacji monitorowania hałasu. Test dotyczący badania wartości bezwzględnej maksymalnej różnicy między wartościami poziomu dźwięku zmierzonymi dla dowolnych dwóch kontów padania fali akustycznej zawartych w danym przedziale kontów określonym względem kierunku odniesienia (Załącznik nr 1 rozporządzenia [172]) pominięto ze względu na fakt iż mikrofon pomiarowy nie jest zintegrowany mechanicznie z obudową stacji monitorującej.

Badanie liniowości stacji

Badanie przeprowadzono za pomocą zewnętrznego generatora (System TWO), podłączając sygnał do przedwzmacniacza za pomocą impedancji zastępczej mikrofonu pomiarowego. W tabeli 1 zestawiono uzyskane wyniki.

Tabela 1. Wyniki badania liniowości stacji pomiarowej za pomocą Systemu TWO

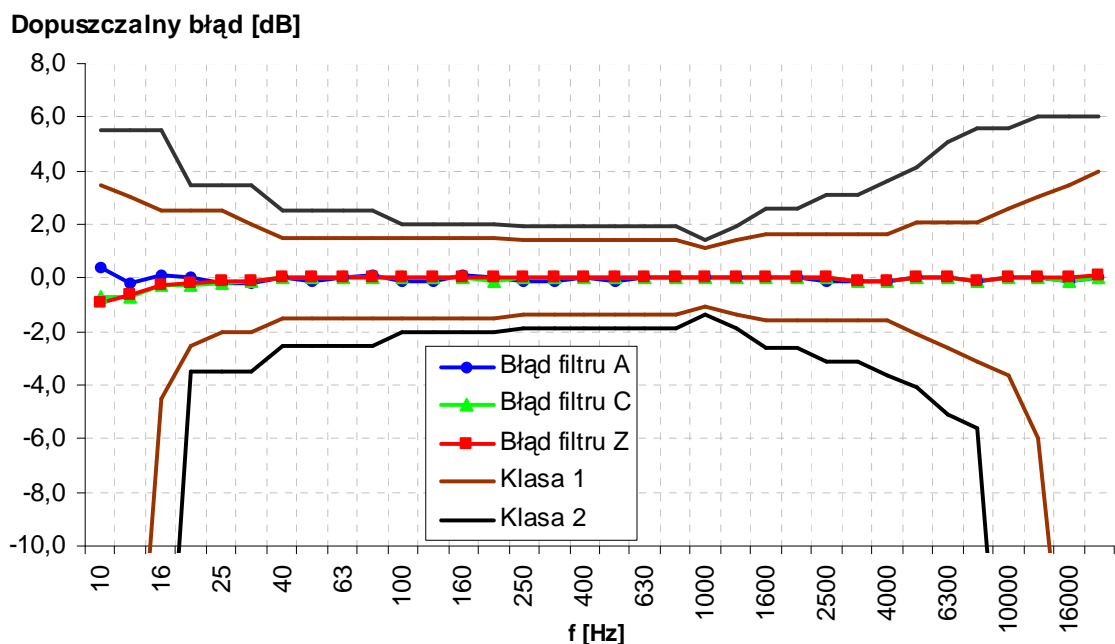
Poziom we	Poziom wy			Poziom we	Poziom wy		
	31,5 Hz	1kHz	8 kHz		31,5 Hz	1kHz	8 kHz
122	122	122	122	92	92	92	92
120	120	120	120	90	90	90	90
118	118	118	118	85	85	85	85
116	116	116	116	80	80	80	80
114	114	114	114	75	75,1	75	75
112	112	112	112	70	70,1	70	70
110	110	110	110	65	65	65	65
108	108	108	108	60	60	60	60
106	106	106	106	55	55,1	55	55
104	104	104	104	50	50,1	50	50
102	102	102	102	45	45,1	45	45
100	100	100	100	40	40,1	40	40,1
98	98	98	98	35	35,2	35,1	35,2
96	96	96	96	30	---	30,3	---
94	94	94	94	25	---	---	---

Badanie charakterystyk korekcyjnych: A / C / Z

Badanie charakterystyk korekcyjnych A / C / Z przeprowadzono w warunkach pola swobodnego oraz za pomocą Systemu TWO. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2. Na rys. 2 przedstawiano w formie wykresów błędy odwzorowania poszczególnych charakterystyk korekcyjnych. Dodatkowo zaprezentowano przedziały dopuszczalnych błędów, zawarte w rozporządzeniu [172].

Tabela 2. Wyniki badania charakterystyk korekcyjnych A / C / Z. Wartości zmierzone, względne oraz błędy odwzorowania podano w dB

f [Hz]	Wartości zmierzone			Wartości względne			Błędy odwzorowania		
	A	C	Z	A	C	Z	błąd A	błąd C	błąd Z
10	24,0	79,0	93,1	-70,0	-15,0	-0,9	0,4	-0,7	-0,9
12,5	30,4	82,1	93,4	-63,6	-11,9	-0,6	-0,2	-0,7	-0,6
16	37,4	85,2	93,7	-56,6	-8,8	-0,3	0,1	-0,3	-0,3
20	43,5	87,5	93,8	-50,5	-6,5	-0,2	0,0	-0,3	-0,2
25	49,1	89,4	93,9	-44,9	-4,6	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1
31,5	54,4	90,9	93,9	-39,6	-3,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1
40	59,4	92,0	94,0	-34,6	-2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50	63,7	92,7	94,0	-30,3	-1,3	0,0	-0,1	0,0	0,0
63	67,8	93,2	94,0	-26,2	-0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
80	71,6	93,5	94,0	-22,4	-0,5	0,0	0,1	0,0	0,0
100	74,8	93,7	94,0	-19,2	-0,3	0,0	-0,1	0,0	0,0
125	77,8	93,8	94,0	-16,2	-0,2	0,0	-0,1	0,0	0,0
160	80,7	93,9	94,0	-13,3	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
200	83,1	93,9	94,0	-10,9	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
250	85,3	94,0	94,0	-8,7	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
315	87,3	94,0	94,0	-6,7	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
400	89,2	94,0	94,0	-4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
500	90,7	94,0	94,0	-3,3	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
630	92,1	94,0	94,0	-1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
800	93,2	94,0	94,0	-0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1000	94,0	94,0	94,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1250	94,6	94,0	94,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1600	95,0	93,9	94,0	1,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	95,2	93,8	94,0	1,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2500	95,2	93,7	94,0	1,2	-0,3	0,0	-0,1	0,0	0,0
3150	95,1	93,4	93,9	1,1	-0,6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
4000	94,9	93,1	93,9	0,9	-0,9	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
5000	94,5	92,7	94,0	0,5	-1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
6300	93,9	92,0	94,0	-0,1	-2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8000	92,8	90,9	93,9	-1,2	-3,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
10000	91,5	89,6	94,0	-2,5	-4,4	0,0	0,0	0,0	0,0
12500	89,7	87,8	94,0	-4,3	-6,2	0,0	0,0	0,0	0,0
16000	87,3	85,4	94,0	-6,7	-8,6	0,0	-0,1	-0,1	0,0
20000	84,7	82,8	94,1	-9,3	-11,2	0,1	0,0	0,0	0,1



Rys. 2. Błędy odwzorowania poszczególnych charakterystyk korekcyjnych

Badanie detektorów o stałych czasowych: I / F / S

Badanie detektorów wartości skutecznej o stałych czasowych I / F / S. Analizę przeprowadzono w oparciu o sygnały testowe w podstacji cyfrowej. Parametry poszczególnych sygnałów zostały dobrane zgodnie z wymaganiami zawartymi w rozporządzeniu. Wyniki przeprowadzonych analiz zamieszczono w tabelach: 3, 4, 5. W tabeli 3 zamieszczono odpowiedzi detektorów na pobudzenie tonem 4000 Hz o zmiennej długości. Wartości ustalone dla poszczególnych stałych czasowych wynosiły odpowiednio: korekcja Z – 100 dB, korekcja A – 101 dB, korekcja C – 99,2 dB.

Tabela 3. Odpowiedzi detektorów na pobudzenie tonem 4000 Hz o zmiennej długości, wartości bezwzględne, podane w dB

Czas trwania [ms]	Korekcja Z			Korekcja A			Korekcja C		
	Det. I	Det. F	Det. S	Det. I	Det. F	Det. S	Det. I	Det. F	Det. S
1000	100,0	100,0	98,0	101,0	101,0	99,0	99,2	99,2	97,2
500	100,0	99,9	96,0	101,0	100,9	96,9	99,2	99,1	95,1
200	100,0	99,1	92,6	101,0	100,0	93,6	99,2	98,2	91,8
100	99,8	97,5	89,8	100,8	98,4	90,8	99,0	96,6	89,0
50	99,0	95,2	86,9	99,9	96,2	87,9	98,1	94,4	86,1
20	96,6	91,8	83,0	97,6	92,7	83,9	95,8	91,0	82,2
10	94,2	88,9	80,0	95,2	89,9	80,9	93,4	88,1	79,2
5	91,5	86,0	77,0	92,5	87,0	77,9	90,7	85,2	76,2
2	87,6	82,0	73,0	88,5	83,0	73,9	86,8	81,2	72,2
1	84,6	79,0	70,0	85,5	79,9	70,9	83,7	78,2	69,2
0,5	81,5	76,0	67,0	82,4	76,9	67,9	80,8	75,2	66,2
0,25	78,5	73,0	64,0	79,4	73,8	64,8	77,8	72,3	63,2

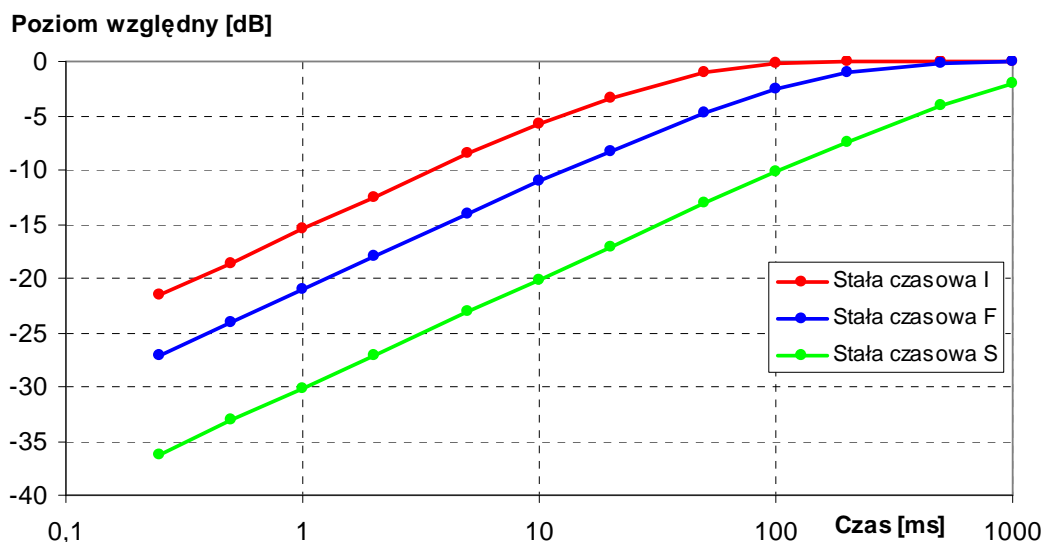
Tabela 3. Odpowiedzi detektorów na pobudzenie tonem 4000 Hz o zmiennej długości, wartości względne, podane w dB

Czas trwania [ms]	Korekcja Z			Korecja A			Korekcja C		
	Det. I	Det. F	Det. S	Det. I	Det. F	Det. S	Det. I	Det. F	Det. S
1000	0,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	-2,0
500	0,0	-0,1	-4,0	0,0	-0,1	-4,1	0,0	-0,1	-4,1
200	0,0	-0,9	-7,4	0,0	-1,0	-7,4	0,0	-1,0	-7,4
100	-0,2	-2,5	-10,2	-0,2	-2,6	-10,2	-0,2	-2,6	-10,2
50	-1,0	-4,8	-13,1	-1,1	-4,8	-13,1	-1,1	-4,8	-13,1
20	-3,4	-8,2	-17,0	-3,4	-8,3	-17,1	-3,4	-8,2	-17,0
10	-5,8	-11,1	-20,0	-5,8	-11,1	-20,1	-5,8	-11,1	-20,0
5	-8,5	-14,0	-23,0	-8,5	-14,0	-23,1	-8,5	-14,0	-23,0
2	-12,4	-18,0	-27,0	-12,5	-18,0	-27,1	-12,4	-18,0	-27,0
1	-15,4	-21,0	-30,0	-15,5	-21,1	-30,1	-15,5	-21,0	-30,0
0,5	-18,5	-24,0	-33,0	-18,6	-24,1	-33,1	-18,4	-24,0	-33,0
0,25	-21,5	-27,0	-36,0	-21,6	-27,2	-36,2	-21,4	-26,9	-36,0

Tabela 4. Odpowiedzi detektorów na pobudzenie tonem 4000 Hz o zmiennej długości, wartości odniesienia podane w rozporządzeniu oraz błędy obliczone dla poszczególnych detektorów. Wartości podano w dB

Wartości odniesienia	Detektor stałej czasowej F			Wartości odniesienia	Detektor stałej czasowej S		
	Z	A	C		Z	A	C
0	0,0	0,0	0,0	-2	0,0	0,0	0,0
-0,1	0,0	0,0	0,0	-4,1	-0,1	0,0	0,0
-1	-0,1	0,0	0,0	-7,4	0,0	0,0	0,0
-2,6	-0,1	0,0	0,0	-10,2	0,0	0,0	0,0
-4,8	0,0	0,0	0,0	-13,1	0,0	0,0	0,0
-8,3	-0,1	0,0	-0,1	-17	0,0	0,1	0,0
-11,1	0,0	0,0	0,0	-20	0,0	0,1	0,0
-14,1	-0,1	-0,1	-0,1	-23	0,0	0,1	0,0
-18	0,0	0,0	0,0	-27	0,0	0,1	0,0
-21	0,0	0,1	0,0	---	---	---	---
-24	0,0	0,1	0,0	---	---	---	---
-27	0,0	0,2	-0,1	---	---	---	---

Na rysunku 3 przedstawiano odpowiedzi detektorów o stałych czasowych I / F / S na pobudzenie tonem o częstotliwości 4000 Hz o zmiennej długości, w oparciu o wartości względne podane w tabeli 3, dla krzywej korekcyjnej A.



Rys. 3. Odpowiedzi detektorów I / F / S, dla krzywej korekcyjnej A

Badanie uśredniania w czasie

Badanie to przeprowadzono w oparciu o sygnały cyfrowe, których parametry zostały dobrane zgodnie z wymaganiami zawartymi w rozporządzeniu. Badanie to ma na celu sprawdzenie poprawności wyznaczania wartości poziomu równoważnego dźwięku. Uzyskane wyniki zostały zestawione w tabeli 5. Kolorem czerwonym zaznaczono wartości bezwzględne dla poszczególnych charakterystyk korekcyjnych, zastosowane do obliczenia wartości względnych. Wszystkie wartości poziomu dźwięku wyrażone w dB. Czas trwania impulsów o zmiennym czasie trwania podano w ms (częstotliwość impulsów zgodnie z rozporządzeniem wynosiła 4000 Hz).

Tabela 5. Wyniki uśredniania w czasie oraz obliczone błędy dla różnych charakterystyk korekcyjnych

Czas trwania imp.	Wartości bezwzględne			Wartości względne			Wart. odniesienia	Błędy uśredniania		
	Korekcja Z	Korekcja A	Korekcja C	Korekcja Z	Korekcja A	Korekcja C		Korekcja Z	Korekcja A	Korekcja C
1000	100,0	101,0	99,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
500	97,0	98,0	96,2	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	0,0	0,0	0,0
200	93,0	94,0	92,2	-7,0	-7,0	-7,0	-7,0	0,0	0,0	0,0
100	90,0	91,0	89,2	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0	0,0	0,0	0,0
50	87,0	87,9	86,2	-13,0	-13,1	-13,0	-13,0	0,0	-0,1	0,0
20	83,0	84,0	82,2	-17,0	-17,0	-17,0	-17,0	0,0	0,0	0,0
10	80,0	81,0	79,2	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0	0,0	0,0	0,0
5	77,0	77,9	76,2	-23,0	-23,1	-23,0	-23,0	0,0	-0,1	0,0
2	73,0	73,9	72,2	-27,0	-27,1	-27,0	-27,0	0,0	-0,1	0,0
1	70,0	70,9	69,2	-30,0	-30,1	-30,0	-30,0	0,0	-0,1	0,0
0,5	67,0	67,9	66,2	-33,0	-33,1	-33,0	-33,0	0,0	-0,1	0,0
0,25	64,0	64,8	63,2	-36,0	-36,2	-36,0	-36,0	0,0	-0,2	0,0

Badanie detektora wartości szczytowej $L_{C\text{Peak}}$

Badanie przeprowadzono za pomocą sygnałów cyfrowych przygotowanych zgodnie z wymogami zawartymi w rozporządzeniu. Uzyskane wyniki analiz zamieszczono w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki badania detektora wartości szczytowej $L_{C\text{Peak}}$

Częstotliwość	L_C	$L_{C\text{Peak}}$	$L_{C\text{Peak}} - L_C$	Wartość odniesienia	Błąd detektora	Błąd dopuszczalny
31,5	100,2	102,3	2,1	2,5	-0,4	$\pm 2,4$
500	103,3	106,3	3	3,5	-0,5	$\pm 1,4$
8000	100,2	102,4	2,2	3,4	-1,2	$\pm 2,4$
500 półokres +	103,3	106	2,7	2,4	0,3	$\pm 1,4$
500 półokres -	103,3	105,9	2,6	2,4	0,2	$\pm 1,4$

Filtry tercjowe

Zastosowane w opracowanej stacji monitorowania hałasu filtry tercjowe oraz algorytm wyznaczania poziomów hałasu widma tercjowego zaprojektowano i przetestowano wstępnie w środowisku MATLAB. Następnie kod algorytmu przepisano na język C++ i zoptymalizowano w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej. Zaimplementowany algorytm wyznaczania widma tercjowego wzorowano na opracowaniu opublikowanego przez firmę Brüel&Kjær [162]. Wyznaczanie widma tercjowego odbywa się iteracyjnie, z wykorzystaniem 3 filtrów tercjowych, przy zastosowaniu 2-krotnej decymacji sygnału wejściowego w kolejnym kroku. Dla uniknięcia efektu nakładania się widm zaprojektowano odpowiedni filtr antyaliasingowy [44]. Wykorzystano w tym przypadku dolnoprzepustowy filtr kaskadowy Czebyszewa pierwszego typu, 3 rzędu, o zafalowaniach w paśmie przepustowym o poziomie 0,05 dB. Dzięki temu uzyskuje się zoptymalizowany obliczeniowo bank filtrów tercjowych. Autor niniejszej rozprawy zaprojektował i przebadął w środowisku MATLAB bank 3 filtrów tercjowych Butterwortha (maksymalnie płaska charakterystyka amplitudowa w paśmie przepustowym [178]) 4 rzędu o częstotliwościach środkowych określonych według ilorazu oktawowego o podstawie 2. Dokładne częstotliwości środkowe tych filtrów wynoszą odpowiednio: 8000,00 Hz, 10079,37 Hz, 12699,21 Hz. Przy zastosowaniu wspomnianego wyżej algorytmu otrzymano bank 30 filtrów tercjowych o częstotliwościach nominalnych od: 16 Hz do 12500 Hz. Wszystkie filtry spełniają zalecenie IEC 1260 (Polska Norma PN-EN 61260:2000) dla klasy 1 (testy wykazały również spełnienie zaleceń dla klasy 0) [153]. Wszystkie filtry zrealizowano z zastosowaniem struktury kanonicznej [146]. W

tabeli 7 podano wartości współczynników dla poszczególnych filtrów tercjowych. W tabeli 8 podano wartości współczynników filtru antyaliasingowego.

Tabela 7. Wartości współczynników filtrów tercjowych zrealizowanych w postaci kanonicznej

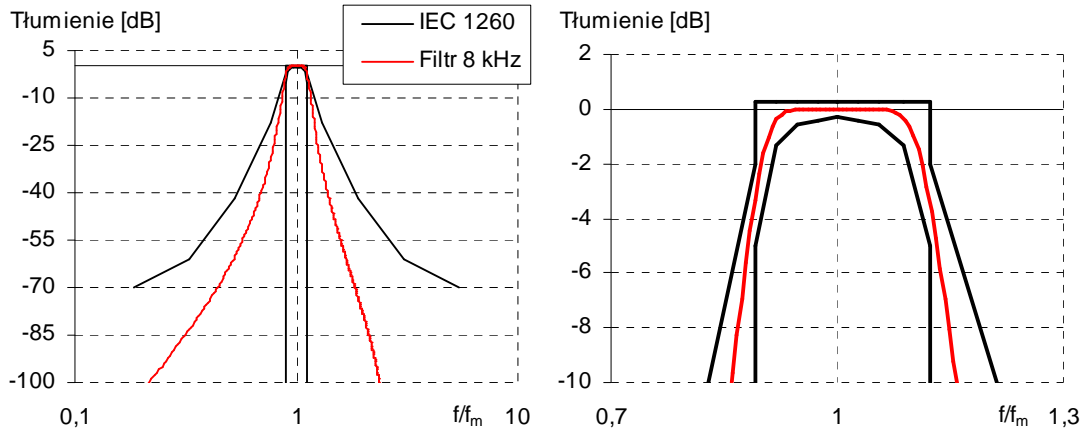
Filtr 8000 Hz	Filtr 10000 Hz	Filtr 12500 Hz
Współczynniki A struktury kanonicznej		
1,00000000000000000000e+000	1,00000000000000000000e+000	1,00000000000000000000e+000
7,26599349934625490000e-001	-1,75743132580359430000e+000	-3,67320727969206560000e+000
3,21345600911566500000e+000	4,37892864910667610000e+000	8,44801455736204510000e+000
1,68634812856925280000e+000	-4,61302586542226050000e+000	-1,24632907205635740000e+001
3,80845607454103560000e+000	5,87580511843101760000e+000	1,36761360595811310000e+001
1,31684766437953590000e+000	-3,79053402215014450000e+000	-1,06634908719630200000e+001
1,96352470228399790000e+000	2,95807418309887280000e+000	6,18394681183334520000e+000
3,44050249992067620000e-001	-9,72766438294967450000e-001	-2,29920150208836030000e+000
3,69641084684050380000e-001	4,54827495399363180000e-001	5,35647509200066210000e-001
Współczynniki B struktury kanonicznej		
8,15520840962502350000e-004	3,52637480114424280000e-004	1,50176981151361810000e-004
0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000
-3,26208336385000940000e-003	-1,41054992045769710000e-003	-6,00707924605447240000e-004
0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000
4,89312504577501390000e-003	2,11582488068654590000e-003	9,01061886908170800000e-004
0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000
-3,26208336385000940000e-003	-1,41054992045769710000e-003	-6,00707924605447240000e-004
0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000
8,15520840962502350000e-004	3,52637480114424280000e-004	1,50176981151361810000e-004

Tabela 8. Wartości współczynników filtru antyaliasingowego zrealizowanego w postaci kanonicznej

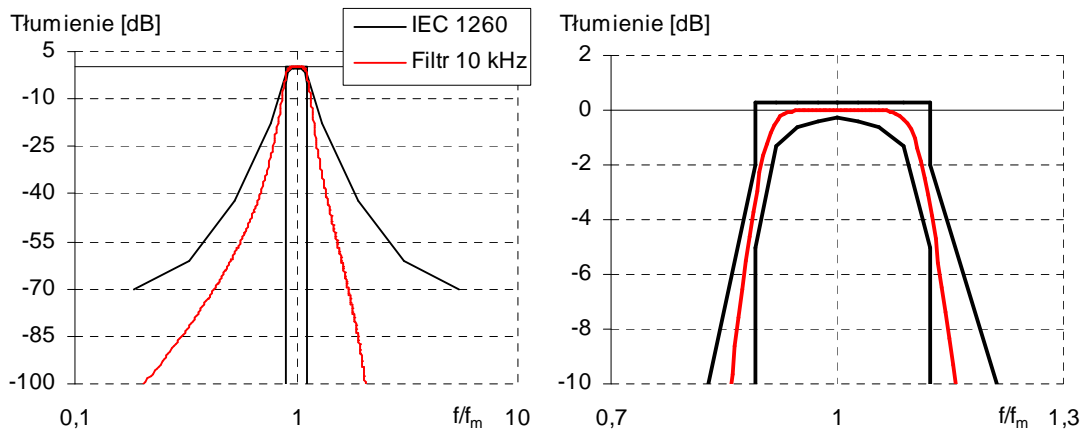
Współczynniki A struktury kanonicznej	Współczynniki B struktury kanonicznej
1,00000000000000000000e+000	5,17113100676079400000e-003
-2,43165934283610820000e+000	2,58556550338039720000e-002
3,06930497157012460000e+000	5,17113100676079430000e-002
-2,20686576096945060000e+000	5,17113100676079430000e-002
8,97645106995732080000e-001	2,58556550338039720000e-002
-1,62948782543952340000e-001	5,17113100676079400000e-003
0,00000000000000000000e+000	0,00000000000000000000e+000

Na rys. 6, 7, 8, 9 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe opracowanych, podstawowych filtrów tercjowych i filtru antyaliasingowego. Dla filtrów tercjowych charakterystyki wykreślono z zaznaczeniem przedziałów dopuszczalnych tłumień

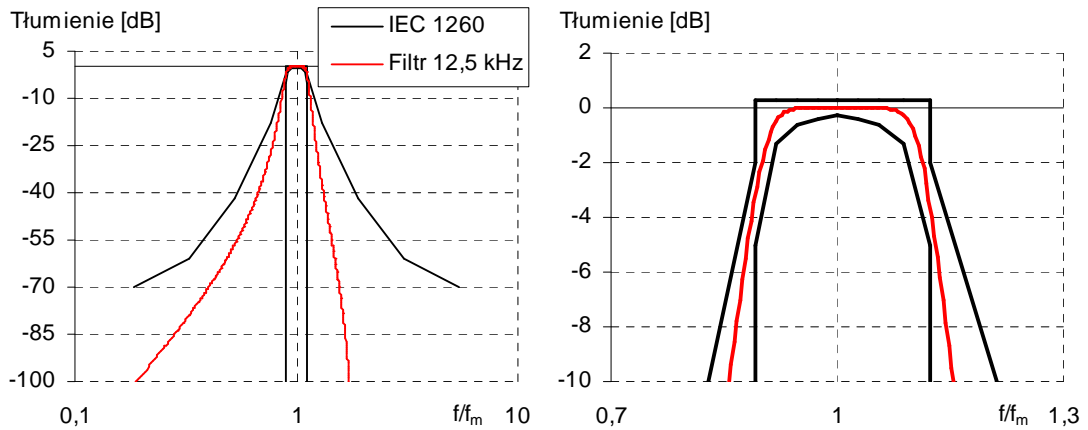
zdefiniowanych w normie międzynarodowej IEC 1260:1995 (Polska Norma PN-EN 61260:2000) [153]. Z prawej strony rysunków 6, 7, 8 przedstawiono powiększony fragment charakterystyki w celu zobrazowania jej zgodności z normą.



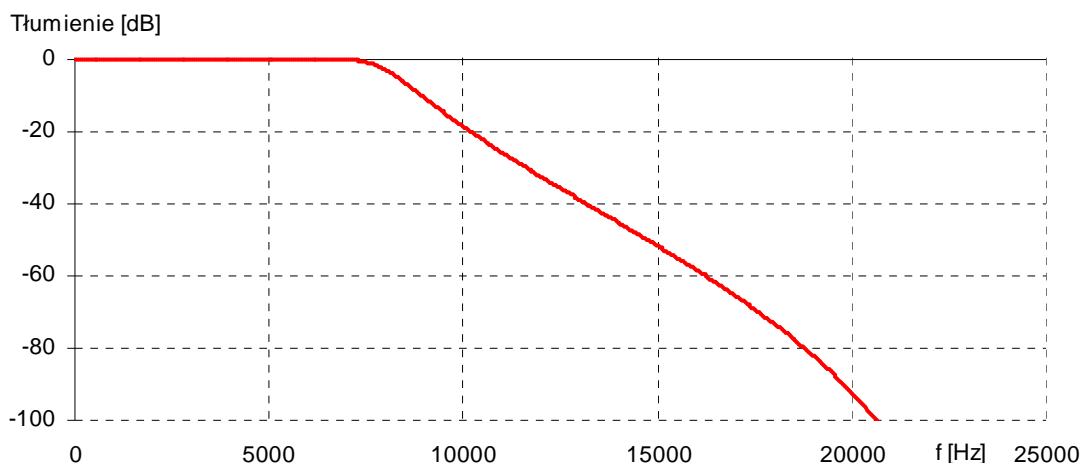
Rys. 6. Charakterystyka częstotliwościowa filtra tercjowego, tercja dolna



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa filtra tercjowego, tercja środkowa

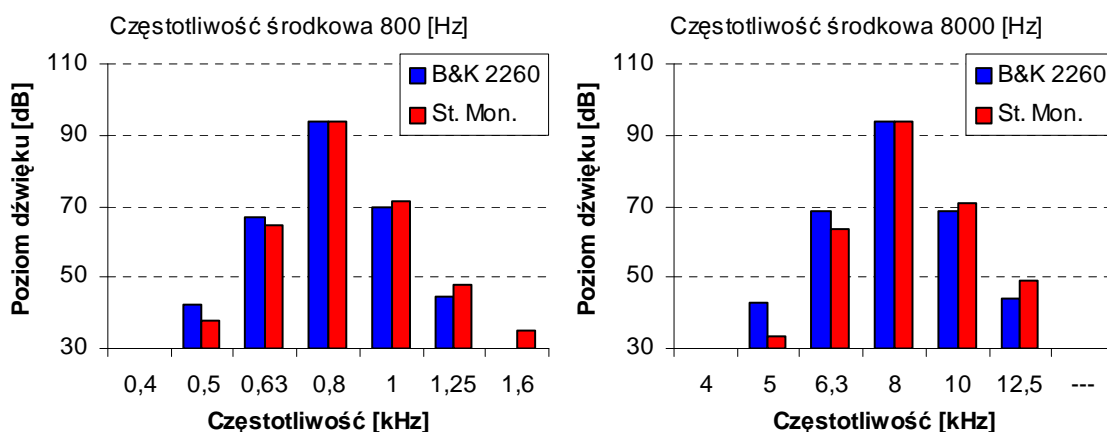


Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa filtra tercjowego, tercja górna

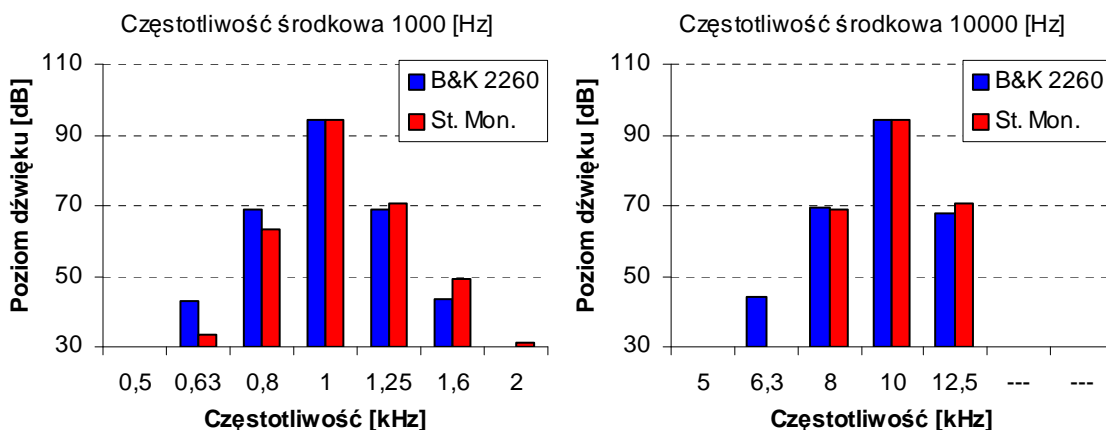


Rys. 9. Charakterystyka częstotliwościowa filtra antyaliasingowego

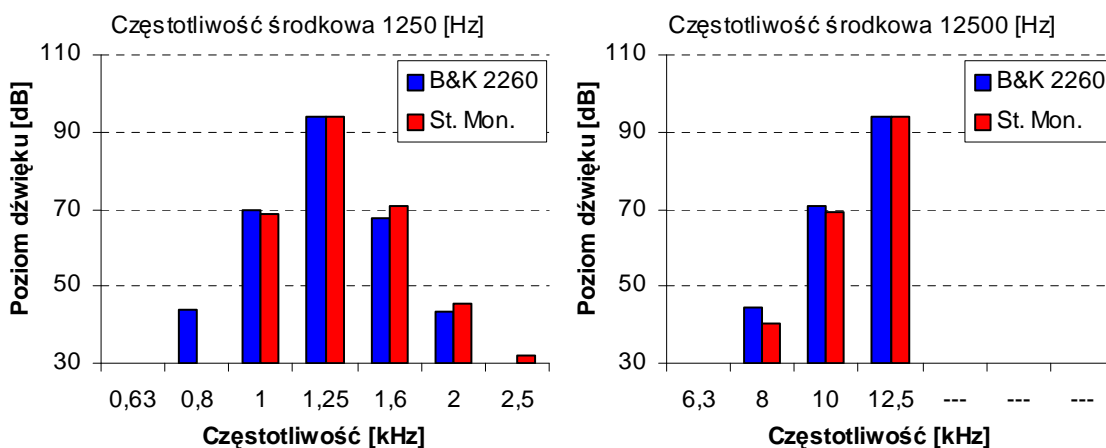
Działanie algorytmu wyznaczania widma tercjowego porównano z analizatorem dźwięku firmy Brüel&Kjær typ 2260 Investigator. Wyniki przedstawiają zmierzone wartości ustalone dla pobudzenia tonalnego dla wybranych częstotliwości środkowych (nominalnych) analizowanych filtrów tercjowych (800, 1000 i 1250 Hz oraz 8000, 10000 i 12500 Hz). Poziom dźwięku wynosił 94 dB, z wyłączoną korekcją częstotliwości. Pomiar miernikiem B&K 2260 dokonano dla zakresu odniesienia, obejmującego przedział: 30 ÷ 110 dB. Uzyskane wyniki zestawiono na rys. 10, 11 i 12. Oś rzędnych na prezentowanych wykresach obejmuje zakres pomiarowy dla miernika B&K 2260. Oznaczenie St. Mon. odnosi się do stacji monitorującej, opracowanej przez autora niniejszej rozprawy.



Rys. 10. Porównanie działania analizatorów widma tercjowego. Odpowiedź na pobudzenie tonalne o częstotliwości środkowej analizowanego filtra, stan ustalony



Rys. 11. Porównanie działania analizatorów widma tercjowego. Odpowiedź na pobudzenie tonalne o częstotliwości środkowej analizowanego filtra, stan ustalony



Rys. 12. Porównanie działania analizatorów widma tercjowego. Odpowiedź na pobudzenie tonalne o częstotliwości środkowej analizowanego filtra, stan ustalony

Uzyskane wyniki analiz wskazują, że opracowany analizator widma tercjowego posiada selektywność porównywalną z analizatorem Brüel&Kjær typ 2260.

Szacowanie niepewności pomiaru

Szacowanie niepewności pomiarów przeprowadzono w oparciu o dane przedstawione w rozprawie doktorskiej G. Wszółek pt. „Badania mikrofonów pomiarowych i mierników poziomu dźwięku w polu swobodnym” [205]. Przeprowadzono oszacowanie niepewności typu B (nie uwzględniono niepewności typ A, dotyczącej statystycznej analizy serii pomiarów, gdyż nie wykonywano serii pomiarów).

Przedstawione wyżej wyniki badań miernika hałasu przeprowadzono z wykorzystaniem systemu TWO oraz z zastosowaniem cyfrowych sygnałów testowych. Oszacowanie niepewności typu B przeprowadzonych pomiarów polegało na określeniu składników wynikających z przyjętej metodologii badań, mających wpływ na uzyskany wynik.

Na niepewność pomiaru z wykorzystaniem systemu TWO mają wpływ następujące czynniki:

- stabilność kalibracji toru pomiarowego,
- stabilność poziomu sygnału akustycznego (zmiana poziomu sygnału na wyjściu generatora),
- niepewność związana z rozdzielczością odczytu miernika.

Dla sygnałów generowanych cyfrowo, użytych do bezpośredniej analizy algorytmu miernika poziomu hałasu, niepewność pomiaru jest mniejsza o wartość czynnika wynikającego ze stabilności poziomu sygnału akustycznego. Niemniej jednak, w procesie oceny uzyskanych wyników uwzględniono maksymalną wartość niepewności rozszerzonej U_{95} typu B uzyskaną w procesie jej szacowania.

Stabilność kalibracji toru pomiarowego – $u(\delta L_{kal})$

W procesie kalibracji zastosowano kalibrator firmy B&K, typ 4231. Jego stabilność krótkoterminowa, podana przez producenta wynosi 0,02 dB. Zgodnie ze wzorem 1, zaczerpniętym z pracy Wszolek [205]:

$$u(\delta L_{kal}) = \frac{0,02}{2 \cdot \sqrt{3}} \approx 0,0058 \text{ dB} \quad (1)$$

Stabilność poziomu sygnału akustycznego – $u(\delta L_{z,s})$

Wartości zaczerpnięte z pracy [205] są podane dla trzech zakresów częstotliwości i wynoszą odpowiednio:

- > 200 Hz do 1,25 kHz: 0,028 dB
- > 1,25 kHz do 10 kHz: 0,039 dB
- > 10 kHz do 20 kHz: 0,13 dB

Niepewność związana z rozdzielczością odczytu miernika - $u(\delta L_{m,r})$

Rozdzielczość miernika z odczytem cyfrowym wynosi 0,1 dB. Niepewność związana z błędem odczytu, przy traktowaniu tego błędu jako zmienną losową o rozkładzie prostokątnym o szerokości 0,05 dB wynosi, zgodnie ze wzorem 2:

$$u(\delta L_{kal}) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ dB} \quad (2)$$

Złożona niepewność standardowa u_c

Zgodnie z prawem propagacji niepewności oraz faktem, że poszczególne rodzaje niepewności są nieskorelowane, niepewność złożona jest sumą geometryczną poszczególnych niepewności cząstkowych, daną wzorem 3.

$$u_c = \sqrt{u(\delta L_{kal})^2 + u(\delta L_{z,s})^2 + u(\delta L_{m,r})^2} \quad (3)$$

Podstawiając do wzoru 3 wartości niepewności cząstkowych otrzymano niepewność złożoną dla poszczególnych zakresów częstotliwości równą:

- > 200 Hz do 1,25 kHz: 0,05 dB
- > 1,25 kHz do 10 kHz: 0,06 dB
- > 10 kHz do 20 kHz: 0,13 dB

Niepewność rozszerzona

Niepewność rozszerzoną pomiaru U [205] uzyskuje się z przemnożenia niepewności u_c , zgodnie z zależnością 4:

$$U = k \cdot u_c \quad (3)$$

Dla niepewności rozszerzonej, wyznaczając przedział o poziomie ufności 95% przyjęto współczynnik rozszerzenia $k = 2$.

Niepewność rozszerzona U_{95} wynosi w kolejnych podzakresach odpowiednio: 0,08 dB, 0,10 dB, 0,27 dB. Maksymalna wartość niepewności rozszerzonej U_{95} , użyta w procesie oceny uzyskanych wyników wynosi $\approx \pm 0,3$ dB.

Podsumowanie

W świetle przedstawionych wyników badań oraz uwzględniając oszacowaną maksymalną wartość niepewności rozszerzonej U_{95} stwierdzono, że opracowana stacja monitorowania hałasu spełnia wymagania stawiane miernikom poziomu dźwięku klasy 1.

10.2. Załącznik 2

Subiektywna ocena ekspozycji na hałas

Ankieta dla uczniów szkoły

I Dane osobowe:

**Uwagi: pkt. 2 właściwe zakreślić
pkt. 1.3-4 wypełnić**

1. Wiek
2. Płeć K / M
3. Klasa
4. Szkoła

II Środowisko

Uwagi: właściwe zakreślić

- w punktach oznaczonych (*) możliwe jest zaznaczenie więcej niż jednej odpowiedzi
- w pozostałych punktach wybrać jedną odpowiedź

1. Miejsce zamieszkania:
a) centrum miasta b) przedmieście c) wieś d) miasteczko
2. Mieszkam w pobliżu hałaśliwej (*):
a) ruchliwej drogi b) trakcji kolejowej c) fabryki, przedsiębiorstwa d) sąsiada
3. Dojeżdżam do szkoły (*):
a) skm / koleją b) autobusem c) samochodem d) pieszo
4. Lubię słuchać muzyki:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho
5. Używam słuchawek:
a) często b) rzadko c) sporadycznie d) nigdy
6. Jak często słucham muzyki:
a) często, codziennie b) prawie codziennie c) sporadycznie
7. Jak długo zazwyczaj słucham muzyki:
a) kilka godzin b) około godziny c) kilkanaście minut d) kilka minut
8. Jakiej muzyki lubię słuchać:
a) agresywnej i głośnej b) wesołej, rytmicznej c) spokojnej
9. Jak często chodzę na dyskoteki, prywatki
a) często b) czasami c) sporadycznie d) nigdy
10. W ciągu dnia w moim otoczeniu jest:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho
11. W nocy w moim otoczeniu jest:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho
12. W gwarze, ruchu ulicznym itp. słyszę mojego rozmówcę:
a) wyraźnie, nie mam problemów ze zrozumieniem
b) słyszę, ale niezbyt wyraźnie
c) mam problemy z usłyszeniem

III Szkoła

1. Nauczyciele na lekcji mówią:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho
2. Na przerwie rozmawiam:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho
3. Słyszę to, co mówi nauczyciel:
a) zazwyczaj wyraźnie: b) mam problemy z dosłyszeniem
4. Wolałbym, żeby był mniejszy hałas na (*)
a) przerwie b) lekcji w-f c) pozostałych lekcjach
5. Na lekcjach jest:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho
6. Na przerwie jest:
a) bardzo głośno b) głośno c) umiarkowanie głośno d) cicho

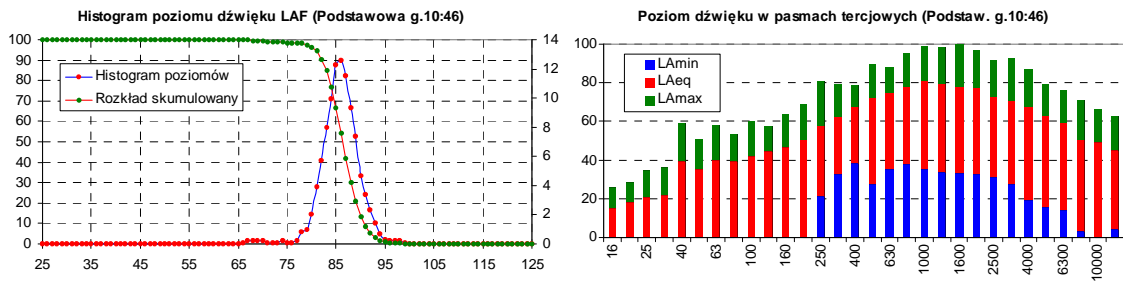
10.3. Załącznik 3

Zestawienie wyników pomiarów hałasu

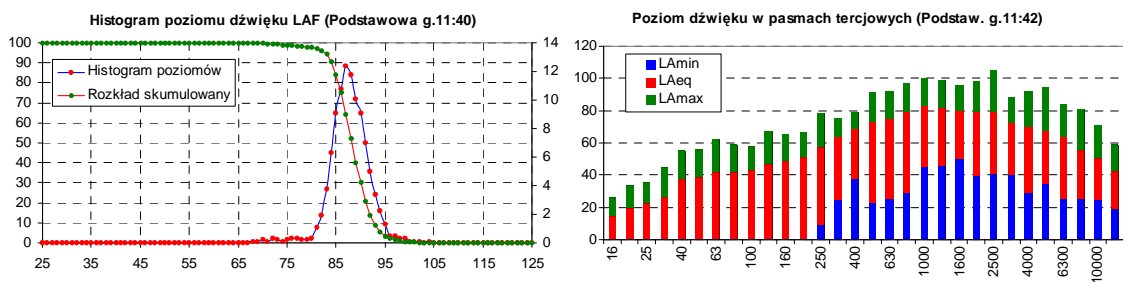
W niniejszym załączniku zestawiono: parametry szerokopasmowe, wykresy przedstawiające histogramy, rozkłady skumulowane poziomów hałasu oraz widma tercjowe (wartości minimalne, równoważne, maksymalne), uzyskane dla poszczególnych pomiarów przeprowadzonych w wybranych szkołach, klubach, podczas prób zespołu muzycznego oraz dla odtwarzaczy mp3 dla różnych poziomów głośności.

Tabela 1. Zbiorcze wyniki pomiarów hałasu wykonane w różnych miejscach narażeń. Wartości poziomów dźwięku podano w dBA, poziom odniesienia wynosił $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, czas ekspozycji jest wyrażony w minutach

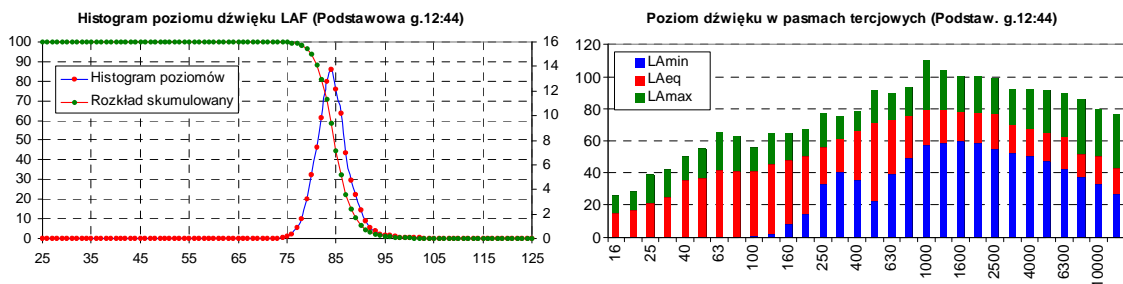
Rodzaj Ekspozycji	L_{AFmin}	L_{Aeq}	L_{AFmax}	L_{90}	L_{10}	Czas ekspozycji
Szkoła podst. p1	64,5	86,9	102,1	82,1	90,8	10
Szkoła podst. p2	67,4	89	105,5	84,1	92,8	10
Szkoła podst. p3	74,5	86,1	111,3	80,7	89,1	20
Gimnazjum p1	67,2	85,5	106,8	81,7	88,6	15
Gimnazjum p2	69,5	84,3	103,1	80,1	87,9	15
Liceum p1	56,5	79,1	93,4	74,6	82,6	10
Liceum p2	72,0	83,6	97,4	80,5	87,0	10
Próba 1	39,9	99,6	111,6	84,2	105,1	50
Próba 2	52,5	100,5	114,4	78,4	105,9	68
Klub 1	76,2	95,3	108,2	91,0	98,5	75
Klub 2	78,0	96,8	112,2	88,9	100,4	90
Klub 3	68,9	99,0	114,2	93,5	102,6	91
Klub 4	70,6	95,5	110,8	85,4	99,4	89
Osoba 1, mp3 1/2	48,0	77,7	87,3	71,1	81,0	30
Osoba 2, mp3 1/2	41,7	82,5	90,6	75,2	85,2	30
Osoba 3, mp3 1/2	---	82,1	95,3	61,5	86,7	30
Osoba 4, mp3 1/2	---	87,3	99,9	77,5	90,6	30
Osoba 1, mp3 2/3	55,8	87,5	96,6	80,9	90,8	30
Osoba 2, mp3 2/3	45,4	88,0	102,0	80,0	91,3	30
Osoba 3, mp3 2/3	---	90,1	103,3	68,3	94,7	30
Osoba 4, mp3 2/3	---	92,1	104,6	82,5	95,4	30



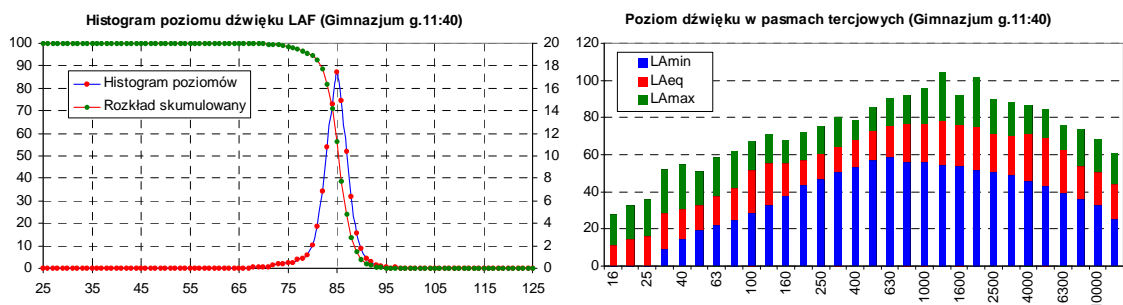
Rys. 1. Wyniki dla szkoły podstawowej, przerwa 1



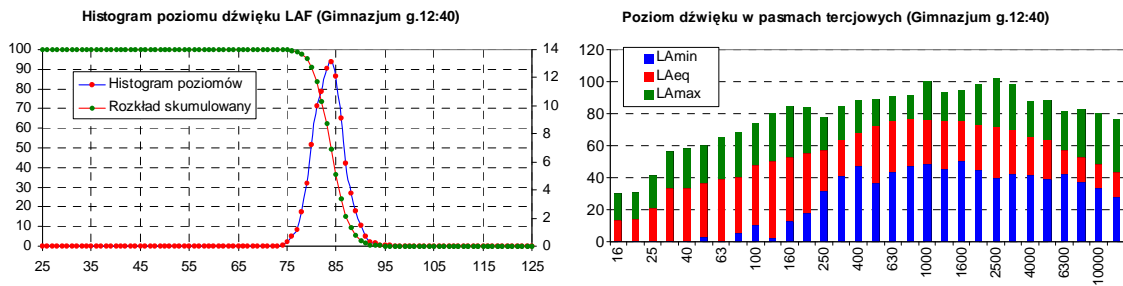
Rys. 2. Wyniki dla szkoły podstawowej, przerwa 2



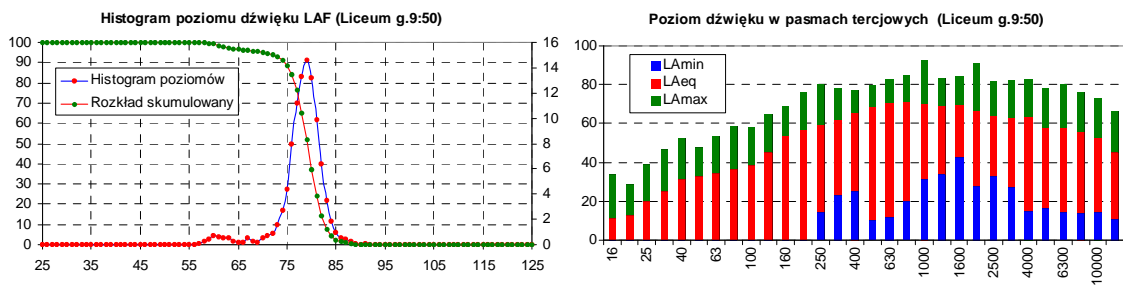
Rys. 3. Wyniki dla szkoły podstawowej, przerwa 3



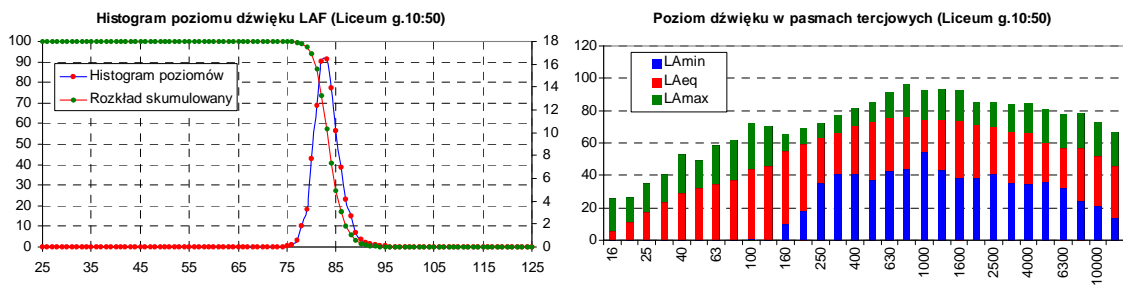
Rys. 4. Wyniki dla gimnazjum, przerwa 1



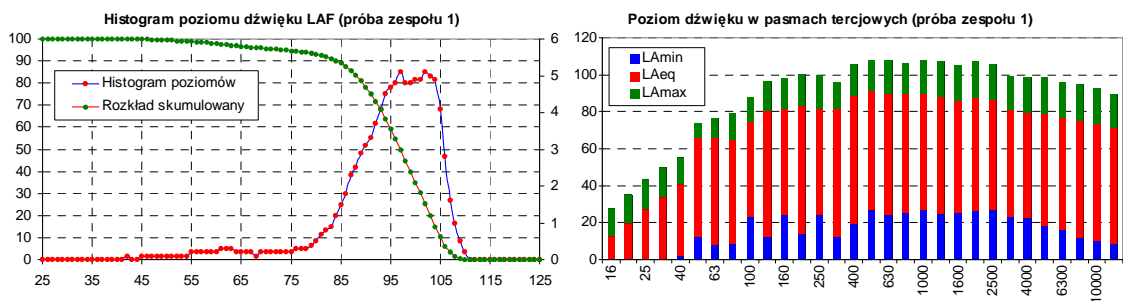
Rys. 5. Wyniki dla gimnazjum, przerwa 2



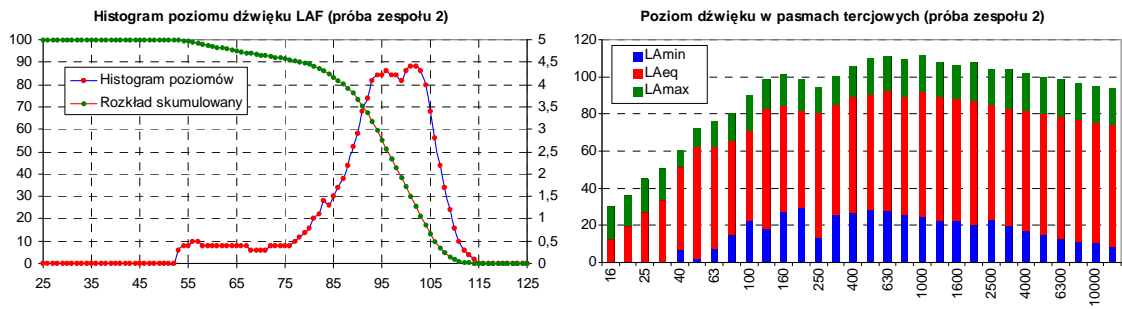
Rys. 6. Wyniki dla liceum, przerwa 1



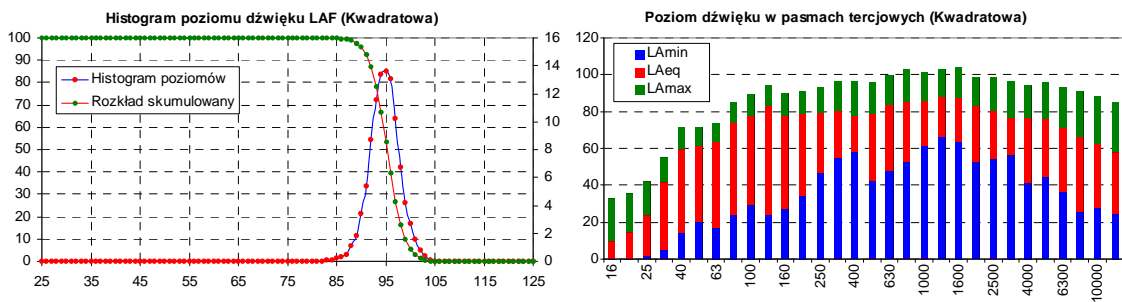
Rys. 7. Wyniki dla liceum, przerwa 2



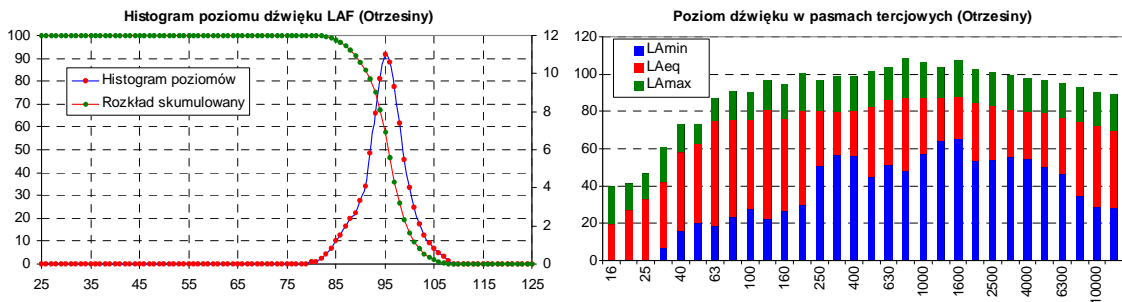
Rys. 8. Wyniki dla 1 próby zespołu



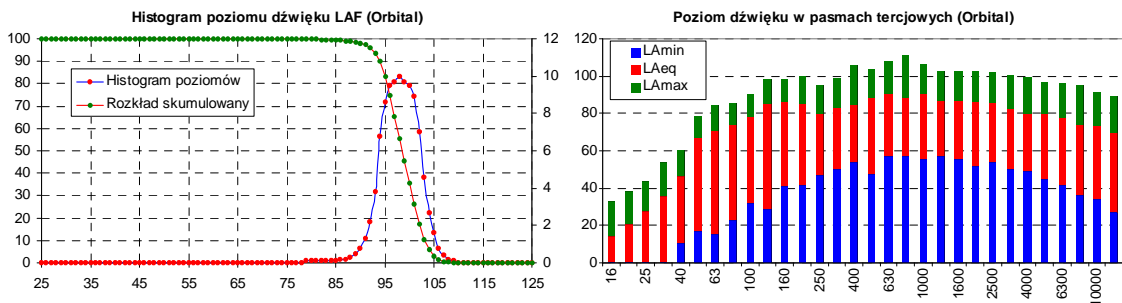
Rys. 9. Wyniki dla 2 próby zespołu



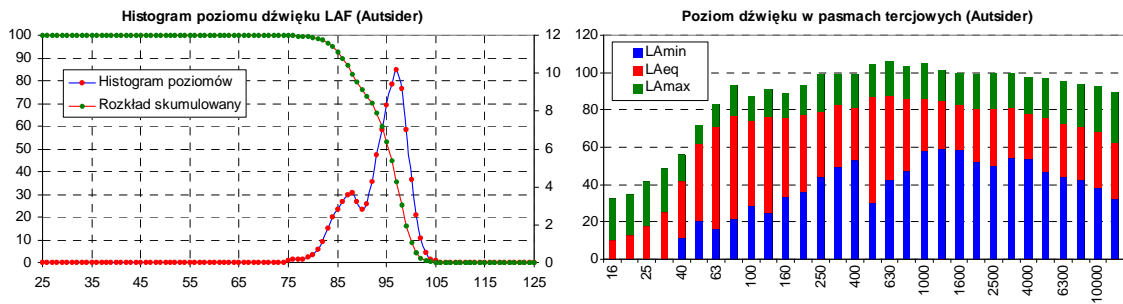
Rys. 10. Wyniki dla klubu 1



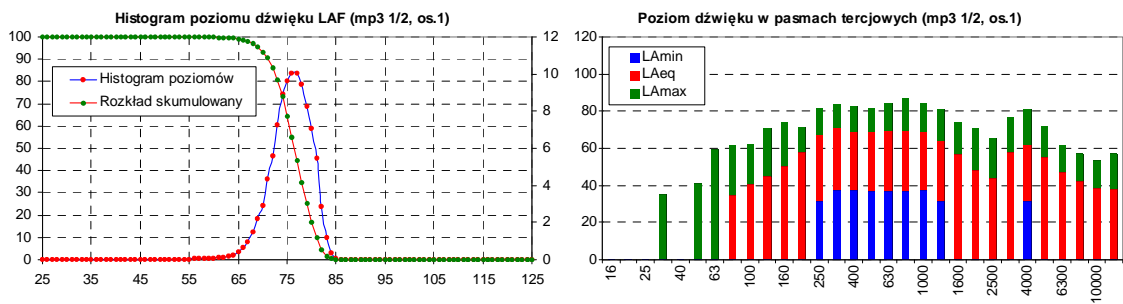
Rys. 11. Wyniki dla klubu 2



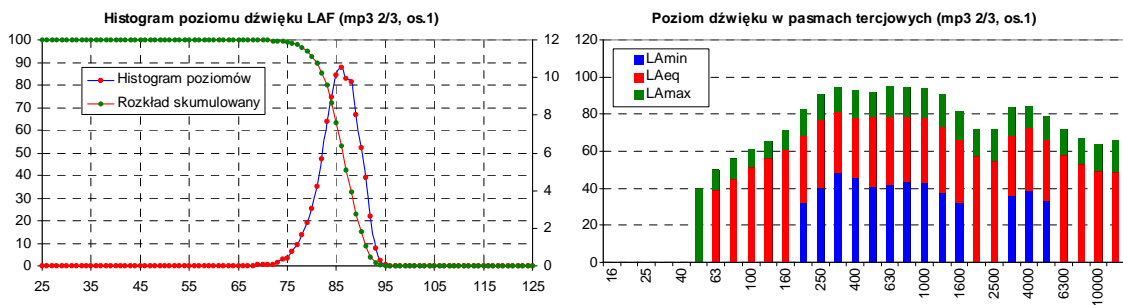
Rys. 12. Wyniki dla klubu 3



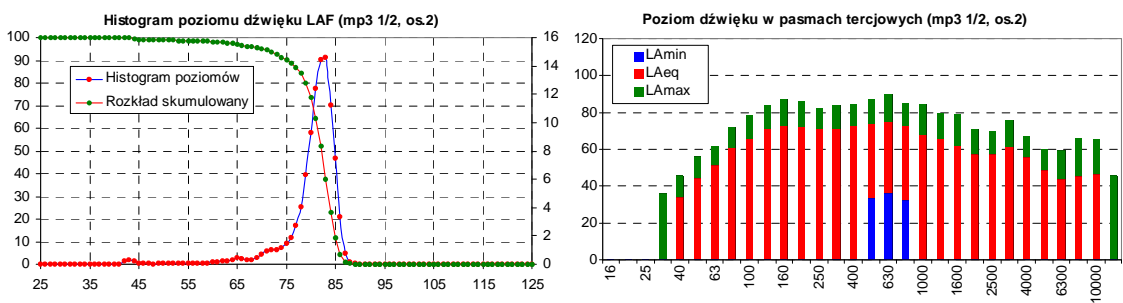
Rys. 13. Wyniki dla klubu 4



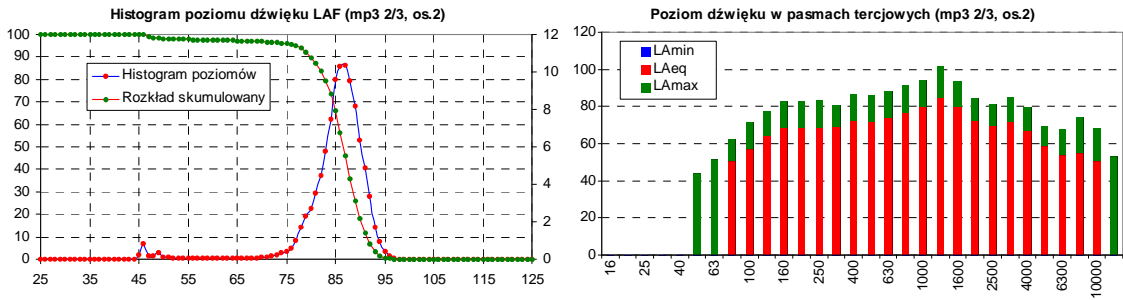
Rys. 14. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 1, poziom 1/2



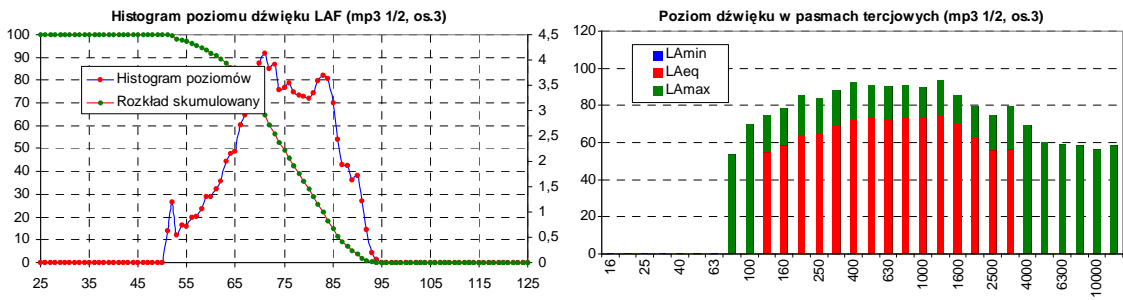
Rys. 15. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 1, poziom 2/3



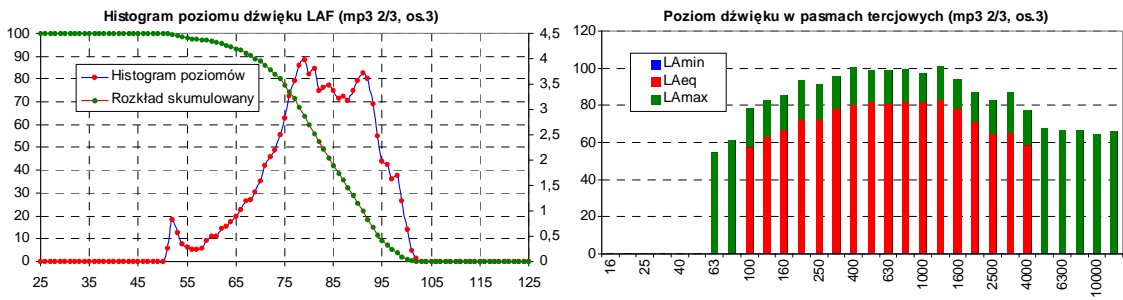
Rys. 16. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 2, poziom 1/2



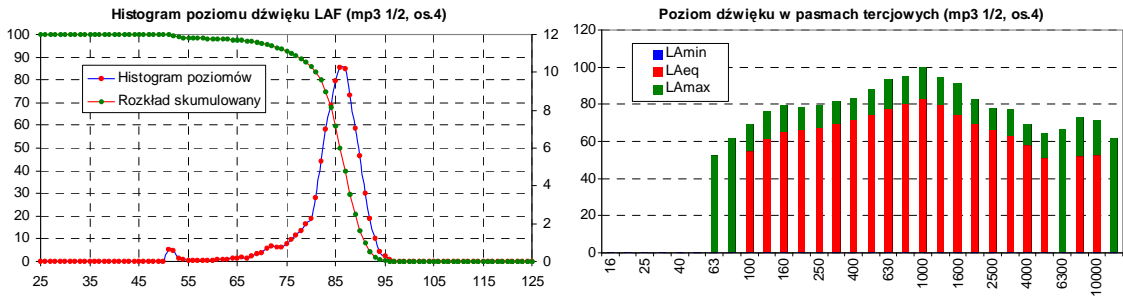
Rys. 17. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 2, poziom 2/3



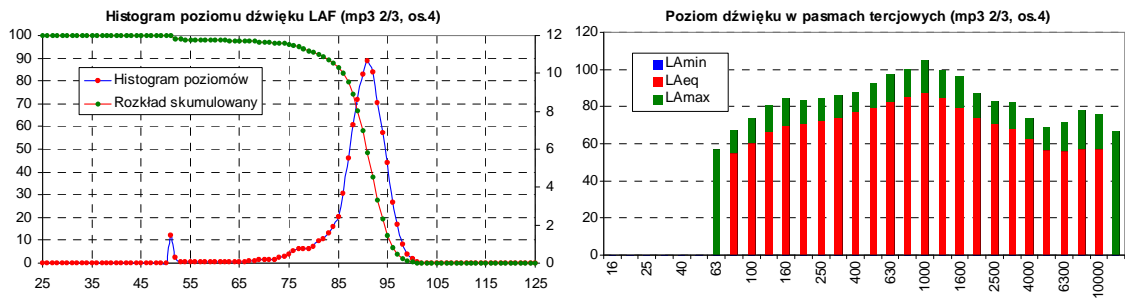
Rys. 18. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 3, poziom 1/2



Rys. 19. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 3, poziom 2/3



Rys. 20. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 4, poziom 1/2



Rys. 21. Wyniki dla odtwarzaczy mp3, osoba 4, poziom 2/3

10.4. Załącznik 4

Analiza wyników pomiarów słuchu uzyskanych za pomocą audiometrii tonalnej

Badania słuchu z wykorzystaniem audiometrii tonalnej przeprowadzono dla różnych rodzajów ekspozycji. Charakteryzowały się one względnie wysokim poziomem hałasu, którego wartość i czas trwania mógł wywołać czasowe przesunięcie progu słyszenia. Były to: kluby, próby i odtwarzacze mp3. Dla uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono trzy rodzaje analiz. Pierwszy rodzaj to analiza zbiorcza. Polegała ona na zliczeniu wszystkich przypadków zmiany progu słyszenia po ekspozycji na hałas. Wyniki badania audiometrycznego przed ekspozycją stanowiły wartość odniesienia. Jeśli po ekspozycji próg słyszenia dla danej częstotliwości był wyższy (pogorszenie czułości słuchu), to notowano wartość ujemną, jeśli próg słyszenia się obniżył (polepszenie czułości słuchu) – zmianę dodatnią. Wynikiem analizy jest procentowo wyrażona wartość: podwyższenia, obniżenia i braku zmiany progu słyszenia.

Drugi rodzaj analizy również polegał na liczeniu zmian progu słyszenia, z tą różnicą, że tym razem rozpatrywano niezależnie każdą z analizowanych częstotliwości.

Trzeci rodzaj analizy polegał na wyznaczeniu poziomu zmian progu słyszenia dla poszczególnych częstotliwości oraz wszystkich rozpatrywanych rodzajów ekspozycji. Poniżej zamieszczono szczegółowe wyniki uzyskanych analiz.

W tabeli 1 zestawiono wyniki pierwszego rodzaju analizy.

Tabela 1. Wyniki zbiorczej analizy zmiany progu słyszenia dla poszczególnych ekspozycji

Ekspozycja	L. pomiar.	Zmiana +	Zmiana –	B. zmiany	Zmiana +	Zmiana –	B. zmiany
Klub 1	140	20	88	32	14,3	62,9	22,9
Klub 2	108	8	77	23	7,4	71,3	21,3
Klub 3	168	21	126	21	12,5	75,0	12,5
Klub 4	126	5	106	15	4,0	84,1	11,9
Próba 1	56	19	21	16	33,9	37,5	28,6
Próba 2	70	8	26	36	11,4	37,1	51,4
mp3 1/2	56	13	9	34	23,2	16,1	60,7
mp3 2/3	56	8	32	16	14,3	57,1	28,6

W tabelach 2 ÷ 9 poniżej przedstawiono wyniki drugiego rodzaju analizy dla wszystkich rodzajów ekspozycji. W tym przypadku sprawdzano uzyskane wyniki niezależnie dla każdej częstotliwości, dla której dokonano pomiaru.

Tabela 2. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 1

Klub 1	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	5	3	0	1	2	5	4
Zmiana –	8	12	15	17	17	12	7
B. zmiany	7	5	5	2	1	3	9
Procentowo							
Zmiana +	25	15	0	5	10	25	20
Zmiana –	40	60	75	85	85	60	35
B. zmiany	35	25	25	10	5	15	45

Tabela 3. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 2

Klub 2	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	0	---	1	0	1	2	4
Zmiana –	11	---	15	14	17	12	8
B. zmiany	7	---	2	4	0	4	6
Procentowo							
Zmiana +	0,0	---	5,6	0,0	5,6	11,1	22,2
Zmiana –	61,1	---	83,3	77,8	94,4	66,7	44,4
B. zmiany	38,9	---	11,1	22,2	0,0	22,2	33,3

Tabela 4. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 3

Klub 3	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	6	2	1	0	2	1	9
Zmiana –	13	18	21	23	21	19	11
B. zmiany	5	4	2	1	1	4	4
Procentowo							
Zmiana +	25,0	8,3	4,2	0,0	8,3	4,2	37,5
Zmiana –	54,2	75,0	87,5	95,8	87,5	79,2	45,8
B. zmiany	20,8	16,7	8,3	4,2	4,2	16,7	16,7

Tabela 5. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 4

Klub 4	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	0	0	1	0	0	1	3
Zmiana –	12	16	17	15	17	16	13
B. zmiany	6	2	0	3	1	1	2
Procentowo							
Zmiana +	0,0	0,0	5,6	0,0	0,0	5,6	16,7
Zmiana –	66,7	88,9	94,4	83,3	94,4	88,9	72,2
B. zmiany	33,3	11,1	0,0	16,7	5,6	5,6	11,1

Tabela 6. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji podczas próby 1

Próba 1	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	2	5	3	2	1	3	3
Zmiana –	3	1	3	3	6	3	2
B. zmiany	3	2	2	3	1	2	3
Procentowo							
Zmiana +	25,0	62,5	37,5	25,0	12,5	37,5	37,5
Zmiana –	37,5	12,5	37,5	37,5	75,0	37,5	25,0
B. zmiany	37,5	25,0	25,0	37,5	12,5	25,0	37,5

Tabela 7. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji podczas próby 2

Próba 2	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	1	1	0	0	3	1	2
Zmiana –	4	2	4	1	4	8	3
B. zmiany	5	7	6	9	3	1	5
Procentowo							
Zmiana +	10,0	10,0	0,0	0,0	30,0	10,0	20,0
Zmiana –	40,0	20,0	40,0	10,0	40,0	80,0	30,0
B. zmiany	50,0	70,0	60,0	90,0	30,0	10,0	50,0

Tabela 8. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3.
Ustawienia głośności na 1/2 skali

mp3 1/2	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	1	2	3	2	1	2	2
Zmiana –	1	1	1	2	0	2	2
B. zmiany	6	5	4	4	7	4	4
Procentowo							
Zmiana +	12,5	25,0	37,5	25,0	12,5	25,0	25,0
Zmiana –	12,5	12,5	12,5	25,0	0,0	25,0	25,0
B. zmiany	75,0	62,5	50,0	50,0	87,5	50,0	50,0

Tabela 9. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3.
Ustawienia głośności na 2/3 skali

mp3 2/3	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Zmiana +	0	1	1	1	1	2	2
Zmiana –	7	2	5	7	4	5	2
B. zmiany	1	5	2	0	3	1	4
Procentowo							
Zmiana +	0,0	12,5	12,5	12,5	12,5	25,0	25,0
Zmiana –	87,5	25,0	62,5	87,5	50,0	62,5	25,0
B. zmiany	12,5	62,5	25,0	0,0	37,5	12,5	50,0

W tabeli 10 zamieszczono wyniki trzeciej analizy, którą było obliczenie poziomu zmiany progu słyszenia dla rozpatrywanych ekspozycji. Dodatkowo wyznaczono wartość minimalną, maksymalną i odchylenie standardowe.

Tabela 10. Wyniki zmian progu słyszenia dla pomiarów słuchu metodą audiometrii tonalnej dla poszczególnych rodzajów ekspozycji

	f [Hz]	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Klub 1	Min	-10	-5	0	-5	-5	-15	-5
	Avg	0,5	4,75	7,25	10,5	11	5,25	2,25
	Max	15	15	20	25	30	20	15
	σ	6,9	6,4	6,2	8,4	9,8	10,3	6,2
Klub 2	Min	0	---	-5	0	-5	-5	-20
	Avg	5,3	---	8,1	9,4	13,1	7,5	1,4
	Max	15	---	20	20	30	25	25
	σ	5,3	---	6,4	6,6	7,9	9,1	10,8
Klub 3	Min	-5	-10	-5	0	-5	-5	-25
	Avg	3,6	7,3	10,2	12,3	15,7	12,5	-0,5
	Max	20	20	20	25	25	40	20
	σ	6,9	7,0	6,1	6,6	8,5	10,1	11,6
Klub 4	Min	0	0	-5	0	0	-5	-15
	Avg	4,4	7,5	8,9	9,4	13,9	12,5	5,6
	Max	15	20	20	20	25	30	20
	σ	4,2	5,2	5,3	5,1	7,0	9,9	8,0
Próba 1	Min	-10	-5	-5	-5	-5	-10	-10
	Avg	0,6	-2,5	0,6	1,9	4,4	0	0
	Max	10	5	10	15	10	10	15
	σ	6,2	3,8	5,6	6,5	5,0	6,5	7,6
Próba 2	Min	-5	-5	0	0	-5	-5	-10
	Avg	2	1	2,5	1	1,5	4,5	1,5
	Max	10	10	10	10	10	10	20
	σ	4,2	3,9	3,5	3,2	5,8	4,4	7,8
mp3 1/2	Min	-5	-5	-5	-5	-5	-10	-5
	Avg	0	-0,6	-0,6	0	-0,6	-0,6	1,9
	Max	5	5	10	5	0	5	15
	σ	2,7	3,2	5,0	3,8	1,8	5,0	7,0
mp3 2/3	Min	0	-5	-5	-5	-5	-10	-5
	Avg	6,9	1,3	3,1	5	3,1	7,5	0
	Max	15	10	10	10	15	35	5
	σ	4,6	4,4	4,6	4,6	5,9	13,6	3,8

10.5. Załącznik 5

Analiza wyników pomiarów słuchu uzyskanych metodą DPOAE

Badania słuchu z wykorzystaniem metody DPOAE przeprowadzono dla różnych rodzajów ekspozycji. Były to: szkoły, kluby, próby i odtwarzacze mp3. Dla uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono dwa rodzaje analiz. Pierwsza, zbiorcza polegała na zliczeniu wszystkich przypadków zmiany poziomu po ekspozycji na hałas. Poziom sygnału DP przed ekspozycją stanowił wartość odniesienia. Jeśli po ekspozycji poziom sygnału DP (dla danej częstotliwości) wzrósł, notowano zmianę dodatnią, jeśli spadł – zmianę ujemną. Wynikiem analizy jest procentowo wyrażona wartość: wzrostu, spadku i braku zmiany poziomu sygnału DP.

Drugi rodzaj analizy również polegał na liczeniu zmian poziomu sygnału DP, z tą różnicą, że tym razem rozpatrywano niezależnie każdą z analizowanych częstotliwości. Poniżej zamieszczono szczegółowe wyniki uzyskanych analiz.

W tabeli 1 zestawiono warunki decyzyjne wykorzystane do obliczenia wyników zmiany poziomu sygnału DP. Dodatkowo uwzględniono status testu odnotowywany przez urządzenie pomiarowe. Konfiguracja systemu pomiarowego została opisana w podrozdziale 6.1.3 *Pomiar słuchu metodą DPOAE*.

Tabela 1. Tabela decyzyjna użyta do analizy wyników pomiarów słuchu metodą DPOAE

Wyniki pomiaru sygnału DP				Dodatkowy warunek	Wynik końcowy
Przed ekspozycją na hałas		Po ekspozycji na hałas			
Poziom DP	Status testu	Poziom DP	Status testu		
A	0	B	0	---	0
A	0	B	1	---	1
A	1	B	0	---	-1
A	1	B	1	$A > B$	-1
A	1	B	1	$A < B$	1
A	1	B	1	$A = B$	0

Legenda: 0 – test niezaliczony, 1- test zaliczony, A, B – wartości poziomu DP uzyskane podczas badania słuchu. Wynik 1 oznacza wzrost aktywności ślimaka, -1 spadek, 0 – brak zmiany.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki zbiorczej analizy dla wszystkich rodzajów ekspozycji.

Tabela 2. Wyniki zbiorczej analizy dla rozpatrywanych ekspozycji

Ekspozycja	L. pomiar.	Zmiana +	Zmiana –	B. zmiany	Zmiana +	Zmiana –	B. zmiany
Klub 1	264	68	125	71	25,8	47,3	26,9
Klub 2	216	24	128	64	11,1	59,3	29,6
Klub 3	288	46	157	85	16,0	54,5	29,5
Klub 4	216	51	121	44	23,6	56,0	20,4
Próba 1	96	18	50	28	18,8	52,1	29,2
Próba 2	120	32	53	35	26,7	44,2	29,2
mp3 1/2	96	39	32	25	40,6	33,3	26,0
mp3 2/3	96	44	30	22	45,8	31,3	22,9
Podstaw.	240	71	64	105	29,6	26,7	43,8
Gimnazjum	120	31	38	51	25,8	31,7	42,5
Liceum	120	44	43	33	36,7	35,8	27,5

W tabelach 3 ÷ 13 przedstawiono wyniki drugiego rodzaju analizy dla wszystkich rodzajów ekspozycji. W tym przypadku sprawdzano uzyskane wyniki niezależnie dla każdej częstotliwości, dla której dokonano pomiaru.

Tabela 3. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 1

Klub 1	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	9	9	7	6	8	7	3	4	7	4	2	2
Zmiana –	6	10	10	12	10	11	17	17	14	12	3	3
B. zmiany	7	3	5	4	4	4	2	1	1	6	17	17
Procentowo												
Zmiana +	40,9	40,9	31,8	27,3	36,4	31,8	13,6	18,2	31,8	18,2	9,1	9,1
Zmiana –	27,3	45,5	45,5	54,5	45,5	50,0	77,3	77,3	63,6	54,5	13,6	13,6
B. zmiany	31,8	13,6	22,7	18,2	18,2	18,2	9,1	4,5	4,5	27,3	77,3	77,3

Tabela 4. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 2

Klub 2	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	3	3	2	1	0	1	0	0	4	3	4	3
Zmiana –	7	11	14	12	15	16	18	15	10	7	2	1
B. zmiany	8	4	2	5	3	1	0	3	4	8	12	14
Procentowo												
Zmiana +	16,7	16,7	11,1	5,6	0,0	5,6	0,0	0,0	22,2	16,7	22,2	16,7
Zmiana –	38,9	61,1	77,8	66,7	83,3	88,9	100,0	83,3	55,6	38,9	11,1	5,6
B. zmiany	44,4	22,2	11,1	27,8	16,7	5,6	0,0	16,7	22,2	44,4	66,7	77,8

Tabela 5. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 3

Klub 3	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	8	7	3	7	5	3	3	2	2	2	4	0
Zmiana –	7	12	18	15	15	20	18	18	17	11	3	3
B. zmiany	9	5	3	2	4	1	3	4	5	11	17	21
Procentowo												

Zmiana +	33,3	29,2	12,5	29,2	20,8	12,5	12,5	8,3	8,3	8,3	16,7	0,0
Zmiana –	29,2	50,0	75,0	62,5	62,5	83,3	75,0	75,0	70,8	45,8	12,5	12,5
B. zmiany	37,5	20,8	12,5	8,3	16,7	4,2	12,5	16,7	20,8	45,8	70,8	87,5

Tabela 6. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w klubie 4

Klub 4	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	6	9	5	7	4	6	3	3	3	3	0	1
Zmiana –	9	6	11	6	10	11	14	15	13	13	10	2
B. zmiany	3	3	2	5	4	1	1	0	2	2	8	15
Procentowo												
Zmiana +	33,3	50,0	27,8	38,9	22,2	33,3	16,7	16,7	16,7	16,7	0,0	5,6
Zmiana –	50,0	33,3	61,1	33,3	55,6	61,1	77,8	83,3	72,2	72,2	55,6	11,1
B. zmiany	16,7	16,7	11,1	27,8	22,2	5,6	5,6	0,0	11,1	11,1	44,4	83,3

Tabela 7. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji podczas próby 1

Próba 1	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	4	2	4	0	3	1	1	1	0	0	1	1
Zmiana –	4	5	3	6	5	6	7	5	5	2	1	1
B. zmiany	0	1	1	2	0	1	0	2	3	6	6	6
Procentowo												
Zmiana +	50,0	25,0	50,0	0,0	37,5	12,5	12,5	12,5	0,0	0,0	12,5	12,5
Zmiana –	50,0	62,5	37,5	75,0	62,5	75,0	87,5	62,5	62,5	25,0	12,5	12,5
B. zmiany	0,0	12,5	12,5	25,0	0,0	12,5	0,0	25,0	37,5	75,0	75,0	75,0

Tabela 8. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji podczas próby 2

Próba 2	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	5	4	3	3	6	1	3	2	2	2	1	0
Zmiana –	3	4	6	5	4	7	4	7	6	3	2	2
B. zmiany	2	2	1	2	0	2	3	1	2	5	7	8
Procentowo												
Zmiana +	50,0	40,0	30,0	30,0	60,0	10,0	30,0	20,0	20,0	20,0	10,0	0,0
Zmiana –	30,0	40,0	60,0	50,0	40,0	70,0	40,0	70,0	60,0	30,0	20,0	20,0
B. zmiany	20,0	20,0	10,0	20,0	0,0	20,0	30,0	10,0	20,0	50,0	70,0	80,0

Tabela 9. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3. Ustawienia głośności na 1/2 skali.

mp3 1/2	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	1	3	2	3	0	2	6	8	5	4	3	2
Zmiana –	2	3	6	5	6	5	1	0	2	1	0	1
B. zmiany	5	2	0	0	2	1	1	0	1	3	5	5
Procentowo												
Zmiana +	12,5	37,5	25,0	37,5	0,0	25,0	75,0	100,0	62,5	50,0	37,5	25,0
Zmiana –	25,0	37,5	75,0	62,5	75,0	62,5	12,5	0,0	25,0	12,5	0,0	12,5
B. zmiany	62,5	25,0	0,0	0,0	25,0	12,5	12,5	0,0	12,5	37,5	62,5	62,5

Tabela 10. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji za pomocą odtwarzaczy mp3. Ustawienia głośności na 2/3 skali.

mp3 2/3	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	2	2	7	7	5	3	4	5	4	2	2	1
Zmiana –	3	6	1	1	2	3	2	3	3	3	1	2
B. zmiany	3	0	0	0	1	2	2	0	1	3	5	5
Procentowo												
Zmiana +	25,0	25,0	87,5	87,5	62,5	37,5	50,0	62,5	50,0	25,0	25,0	12,5
Zmiana –	37,5	75,0	12,5	12,5	25,0	37,5	25,0	37,5	37,5	37,5	12,5	25,0
B. zmiany	37,5	0,0	0,0	0,0	12,5	25,0	25,0	0,0	12,5	37,5	62,5	62,5

Tabela 11. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w szkole podstawowej

Podstaw.	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	2	4	6	1	6	10	10	11	8	8	3	2
Zmiana –	2	7	5	7	9	8	7	4	3	5	4	3
B. zmiany	16	9	9	12	5	2	3	5	9	7	13	15
Procentowo												
Zmiana +	10,0	20,0	30,0	5,0	30,0	50,0	50,0	55,0	40,0	40,0	15,0	10,0
Zmiana –	10,0	35,0	25,0	35,0	45,0	40,0	35,0	20,0	15,0	25,0	20,0	15,0
B. zmiany	80,0	45,0	45,0	60,0	25,0	10,0	15,0	25,0	45,0	35,0	65,0	75,0

Tabela 12. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w gimnazjum

Gimnazjum	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	1	2	0	1	4	6	4	4	3	4	1	1
Zmiana –	5	6	5	4	5	3	4	2	2	1	0	1
B. zmiany	4	2	5	5	1	1	2	4	5	5	9	8
Procentowo												
Zmiana +	10,0	20,0	0,0	10,0	40,0	60,0	40,0	40,0	30,0	40,0	10,0	10,0
Zmiana –	50,0	60,0	50,0	40,0	50,0	30,0	40,0	20,0	20,0	10,0	0,0	10,0
B. zmiany	40,0	20,0	50,0	50,0	10,0	10,0	20,0	40,0	50,0	50,0	90,0	80,0

Tabela 13. Szczegółowe wyniki analizy dla ekspozycji w liceum

Liceum	1062	1312	1562	1812	2187	2625	3062	3687	4375	5187	6187	7375
Zmiana +	3	3	3	5	4	3	5	5	5	5	2	1
Zmiana –	3	5	4	2	5	4	4	4	5	4	2	1
B. zmiany	4	2	3	3	1	3	1	1	0	1	6	8
Procentowo												
Zmiana +	30,0	30,0	30,0	50,0	40,0	30,0	50,0	50,0	50,0	50,0	20,0	10,0
Zmiana –	30,0	50,0	40,0	20,0	50,0	40,0	40,0	40,0	50,0	40,0	20,0	10,0
B. zmiany	40,0	20,0	30,0	30,0	10,0	30,0	10,0	10,0	0,0	10,0	60,0	80,0

10.6. Załącznik 6

Wyznaczanie wartości stałych dla czynnika strukturalnego zanikania efektu TTS

Opierając się na wynikach uzyskanych przez Irlego i ich dokładnej analizie stwierdzono, że różnica w zanikaniu efektu TTS wywołanego szumem i szumem z impulsami jest spowodowana zmianami strukturalnymi w ślimaku. Kontynuując ten tok rozumowania, na podstawie danych literaturowych przyjęto założenie, że zanikanie efektu TTS jest w ogólności sumą dwóch procesów: metabolicznego i strukturalnego. W opracowanym psychoakustycznym dozymetrze hałasowym przyjęto, że czynnik metaboliczny zanika ze stałą czasową równą 20 minut. Różnica pomiędzy rzeczywistym przebiegiem zanikania TTS pochodzącym z pomiarów słuchu a przebiegiem uzyskanym dla czynnika metabolicznego jest poszukiwaną częścią zanikania procesu TTS wynikającą z czynników strukturalnych. Obliczono różnice w przebiegach zarówno dla ekspozycji typu „szum+impulsy” oraz dla przypadku „szum”. Poszukiwanie analitycznego opisu uzyskanych krzywych rozpoczęto od wizualnej oceny kształtu uzyskanych krzywych.

Zauważono, że ich kształt najlepiej odzwierciedla krzywa opisana równaniem (wzór ten jest tożsamy z przedstawionym w rozdziale 7 wzorem 7.9):

$$y = ax^b e^{cx} \quad (1)$$

gdzie:

y – poziom TTSs (czynnik strukturalny procesu TTS)

x – czas (wyrażony w minutach)

a, b, c – poszukiwane stałe

Opierając się na zaleceniach dostępnych w poradniku encyklopedycznym [18], przeprowadzono procedurę poszukiwania stałych a , b i c , występujących we wzorze 1. Poszukiwanie wzoru przeprowadzono dla danych pochodzących z wyników ekspozycji na sygnał szum+impulsy, ze względu na to, iż dla tej ekspozycji czynnik strukturalny ma największy udział w zanikaniu efektu TTS. W tabeli 1 przedstawiono poszczególne dane konieczne do przeprowadzenia obliczeń. Wartości zaznaczone kolorem czerwonym nie zostały uwzględnione w procesie obliczeniowym ze względu na dziedzinę logarytmu. Kolorem niebieskim zaznaczono wartości x i y które zostały wykorzystane do znalezienia stałych a , b i c .

Tabela 1. Wyniki cząstkowe obliczeń

x	y	(x/y)	$\Delta(x/y)$	$\log x$	$\log y$	$\Delta \log x$	$\Delta \log y$	$\Delta_1 \log y$
2	2,15	0,93	-9,11	0,30	0,33	0,301	---	---
4	-0,49	-8,18	-2,85	0,60	---	0,176	---	---
6	-0,54	-11,02	-5,17	0,78	--	0,125	---	---
8	-0,49	-16,20	0,06	0,90	---	0,097	---	---
10	-0,62	-16,14	-98,52	1,00	---	0,079	---	---
12	-0,10	-114,66	126,66	1,08	---	0,067	---	---
14	1,17	12,01	-2,05	1,15	0,07	0,058	0,139	0,14
16	1,61	9,96	-1,88	1,20	0,21	0,051	0,142	0,25
18	2,23	8,08	-1,04	1,26	0,35	0,046	0,106	0,28
20	2,84	7,03	-0,05	1,30	0,45	0,097	0,100	0,16
25	3,58	6,98	0,09	1,40	0,55	0,079	0,074	0,05
30	4,24	7,07	0,82	1,48	0,63	0,067	0,020	-0,08
35	4,44	7,88	1,76	1,54	0,65	0,058	-0,029	-0,23
40	4,15	9,64	0,74	1,60	0,62	0,051	0,019	-0,41
45	4,33	10,38	1,98	1,65	0,64	0,046	-0,030	-0,55
50	4,05	12,36	2,42	1,70	0,61	0,041	-0,036	-0,61
55	3,72	14,78	2,40	1,74	0,57	0,038	-0,028	-0,79
60	3,49	17,18	3,99	1,78	0,54	0,067	-0,024	-1,07
70	3,31	21,16	9,38	1,85	0,52	0,058	-0,101	-0,52
80	2,62	30,54	8,44	1,90	0,42	0,051	-0,055	
90	2,31	38,99	22,62	1,95	0,36	0,046	-0,153	
100	1,62	61,61	17,37	2,00	0,21	0,041	-0,066	
110	1,39	78,98	18,19	2,04	0,14	0,038	-0,052	
120	1,23	97,17	18,29	2,08	0,09	0,051	-0,024	
135	1,17	115,46	36,75	2,13	0,07	0,046	-0,074	
150	0,99	152,21	55,82	2,18	-0,01	0,041	-0,094	
165	0,79	208,03	93,60	2,22	-0,10	0,038	-0,124	
180	0,60	301,63	89,57	2,26	-0,22	0,035	-0,078	
195	0,50	391,20	310,49	2,29	-0,30	0,032	-0,222	
210	0,30	701,69	1556,02	2,32	-0,52	0,030	-0,478	
225	0,10	2257,71	-2257,71	2,35	-1,00	-2,352	1,001	

Równania warunkowe postaci: $\Delta_1 \log y = b \log 2 + cx \log e$ pogrupowano w taki sposób, by wykorzystać dostępne dane. W pierwszej grupie dodano 7 a w drugiej grupie 6 równań (wybrane wartości $\Delta_1 \log y$ odpowiadające poszczególnym grupom zaznaczono kolorami, odpowiednio zielonym i pomarańczowym).

Obliczając odpowiednie sumy dla poszczególnych grup, otrzymano następujący układ równań:

$$\begin{cases} 0,57 = 2,11 \cdot b + 68,62 \cdot c \\ -3,95 = 1,81 \cdot b + 138,97 \cdot c \end{cases} \quad (2)$$

Stąd, otrzymano wartości:

$$b = 2,3616565834247$$

$$c = -0,064214249075966$$

Stałą a obliczono dodając równania postaci: $\log y = \log a + b \log x + c \log e \cdot x$ i podstawiając wcześniej obliczone wartości stałych b i c . Wykonując sumowanie, otrzymano równanie:

$$5,54 = 25 \cdot \log a + 84,62 - 36,82 \quad (3)$$

Rozwiązując powyższe równanie otrzymano wartość stałej a :

$$a = 0,0270680588133$$

Ze względu na nierównomierny rozkład wartości x i y uzyskane wartości stałych a , b i c wymagały dodatkowej korekty. Wprowadzono ją w taki sposób, aby zminimalizować wartość błędu średniokwadratowego dla wynikowego, modelowego przebiegu TTS (TTS metaboliczny + TTS strukturalny). Wartością odniesienia był przebieg średnich wartości TTS uzyskany na podstawie pomiarów słuchu.

Ostateczne wartości stałych a , b i c wynoszą odpowiednio:

$$a = 0,018964470954021$$

$$b = 1,8653629319818$$

$$c = -0,03788640695482$$

Końcowa postać poszukiwanego wzoru ma postać:

$$y = 0,018964470954021 \cdot x^{1,8653629319818} e^{-0,03788640695482 \cdot x} \quad (4)$$

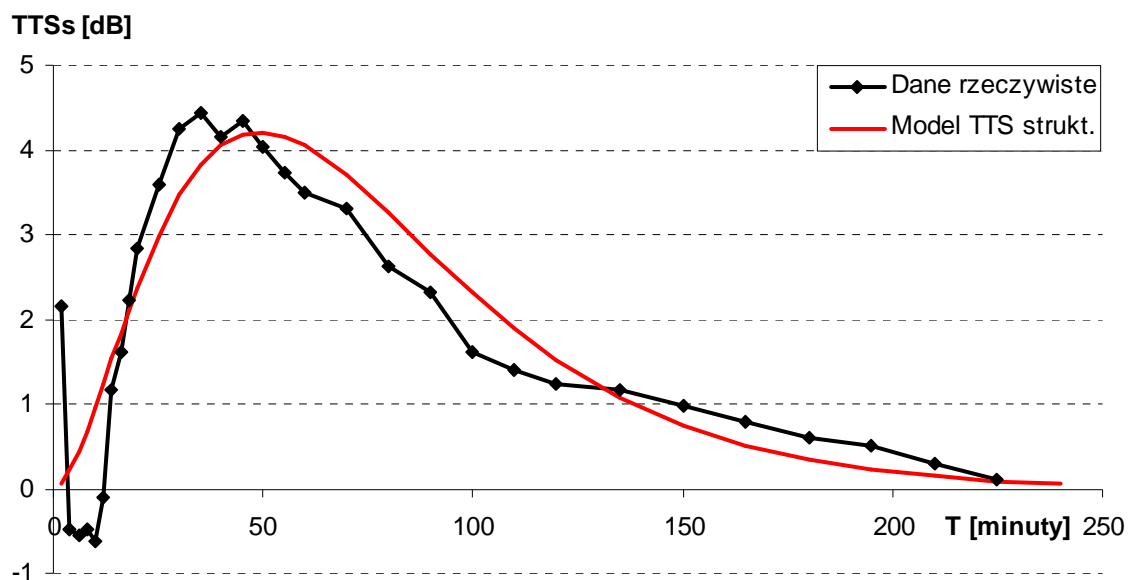
Wzór ten jest tożsamy z przedstawionym w rozdziale 7 wzorem 7.10.

Na rysunku 1 przedstawiono rzeczywisty i modelowy przebieg procesu TTS opisujący czynnik strukturalny.

Bardzo ważnym zagadnieniem funkcjonalnym jest odpowiednie modyfikowanie wzoru opisującego czynnik strukturalny w zależności od rodzaju ekspozycji. W tym celu przyjęto założenie, że chwilowa wartość TTS na koniec ekspozycji zostanie wykorzystana do wyznaczenia udziału czynnika strukturalnego w procesie zanikania TTS. Takie podejście nie jest pozbawione podstaw. Opiera się ono na spostrzeżeniach zawartych w dostępnych publikacjach.

- im wyższy TTS tym dłużej trwa jego zanikanie (trywialne),
- im wyższy TTS tym większy udział czynnika strukturalnego,
- czynnik strukturalny ujawnia się głównie przy ekspozycji na hałas impulsowy.
- przy niskich poziomach TTS udział czynnika strukturalnego jest bardzo mały, dominuje czynnik metaboliczny.
- przy dużych poziomach TTS czynnik strukturalny zaczyna gwałtownie wzrastać.

Obliczono zatem przebieg czynnika strukturalnego dla ekspozycji Irlega na sygnał szumowy. Doświadczalnie stwierdzono, że wystarczy zmodyfikować wartość stałej c ze wzoru 1, aby uzyskać zadowalające przybliżenie rozpatrywanego przebiegu.



Rys. 1. Rzeczywisty przebieg czynnika odpowiedzialnego za zmiany strukturalne w procesie zanikania efektu TTS. Kolorem czerwonym zaznaczono modelowy przebieg funkcji według znalezionej wzoru.

Podobny zabieg przeprowadzono wyników badań uzyskanych przez autora dla ekspozycji na ograniczony pasmowo szum biały o poziomie 88 dBA. Eksperymentalnie dobrano postać wzoru, który najlepiej będzie odzwierciedlał zmiany parametru c w zależności od poziomu TTS. Okazało się, że najlepiej przytoczone wyżej sformułowania oraz uzyskane wyniki obliczeń odzwierciedla funkcja potęgowa postaci:

$$c(TTS) = a \cdot TTS^b \quad (5)$$

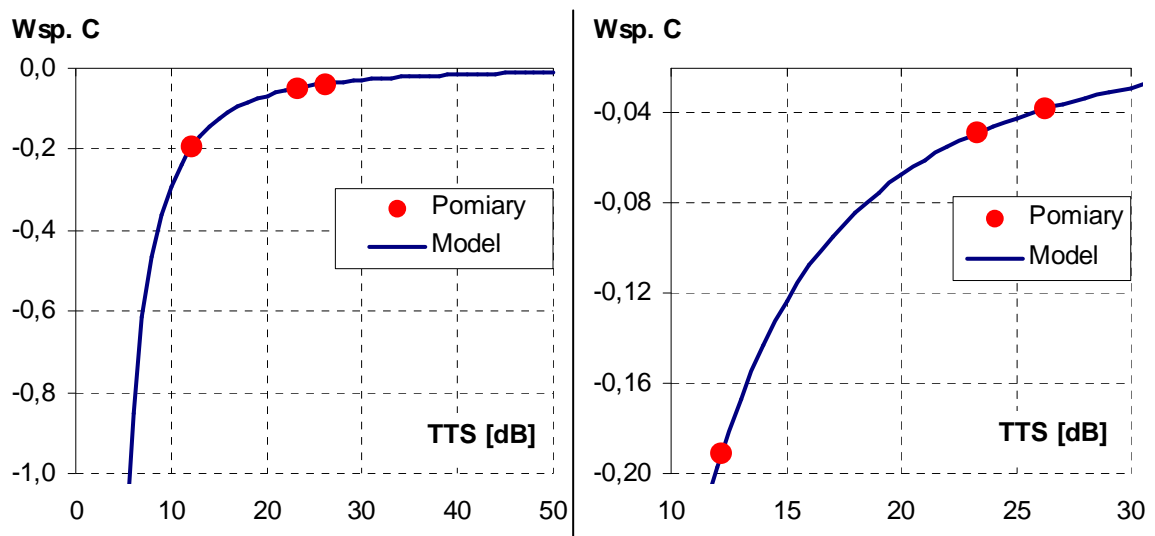
Opierając się na wartościach współczynnika c uzyskanego dla analizowanych przebiegów TTS (podanych w tabeli 2), obliczona postać funkcji odwzorowującej wartości TTS w zbiór wartości parametru c ma postać (wzór ten jest tożsamy z przedstawionym w rozdziale 7 wzorem 7.11):

$$c(TTS) = 37,3957467352539 \cdot TTS^{-2,10998305340892} \quad (6)$$

Tabela 2. Dyskretne wartości współczynnika c dla rozpatrywanych ekspozycji

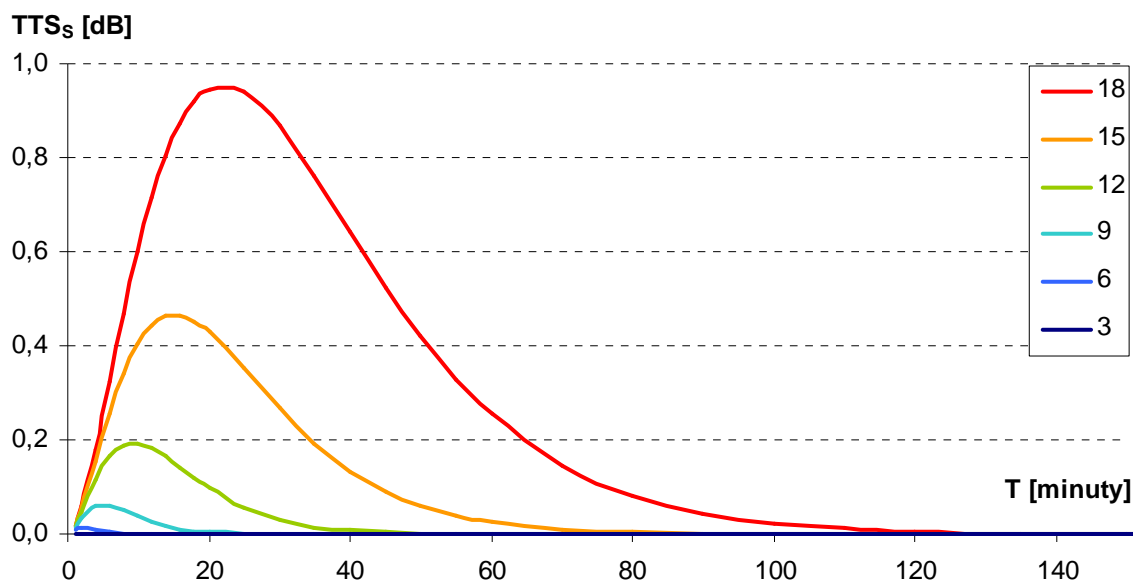
	Szum+impulsy 94 [dBA]	Szum 94 [dBA]	Szum pasmowy 88 [dBA]
TTS [dB]	26,25	23,30	12,19
Wsp. c	0,03788640695482	0,0487219193438985	0,191005945859552

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg funkcji danej wzorem 6. Jest to funkcja, która umożliwia automatyczne dopasowanie stałej c dla zadanej wartości czasowego przesunięcia progu słyszenia występującego na koniec ekspozycji.

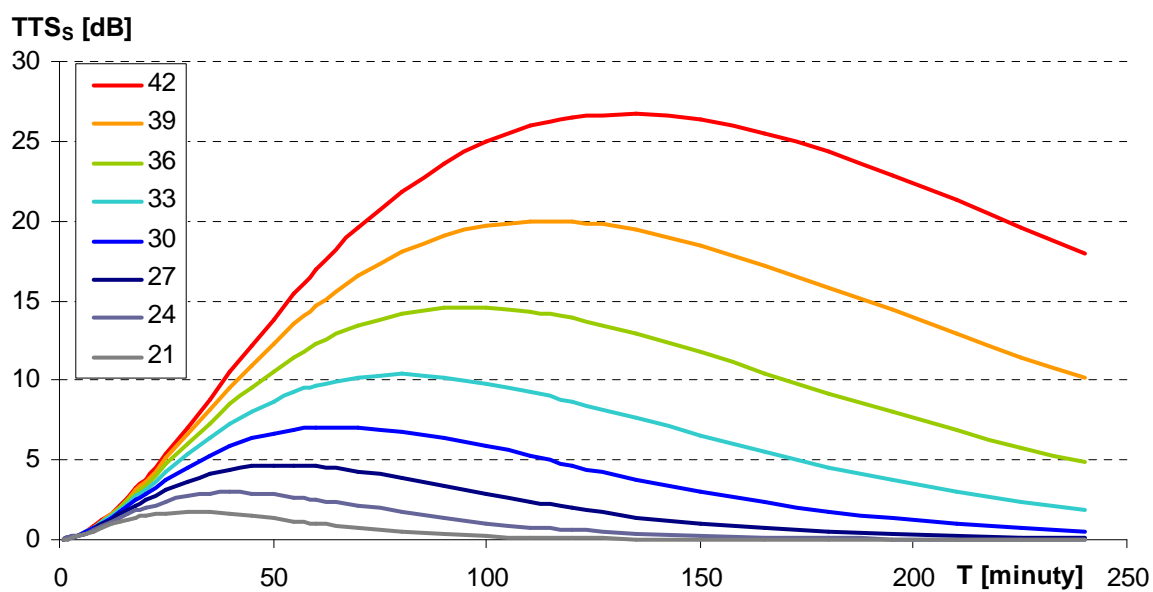


Rys. 2. Przebieg funkcji umożliwiającej wyznaczenie parametru c na podstawie poziomu TTS

Bazując na tak przygotowanych zależnościach, sporządzono rodzinę przebiegów opisujących udział czynnika strukturalnego w zależności od poziomu TTS. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



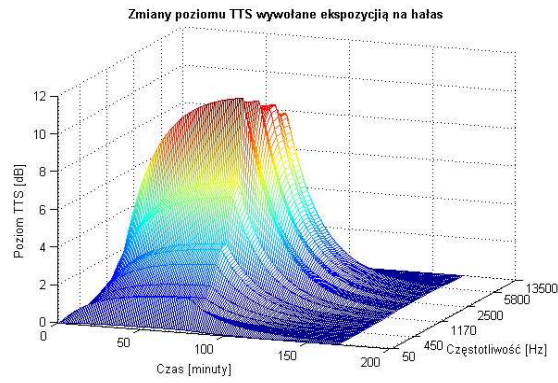
Rys. 3. Przebiegi czynnika strukturalnego dla wartości TTS z przedziału 3 – 18 dB



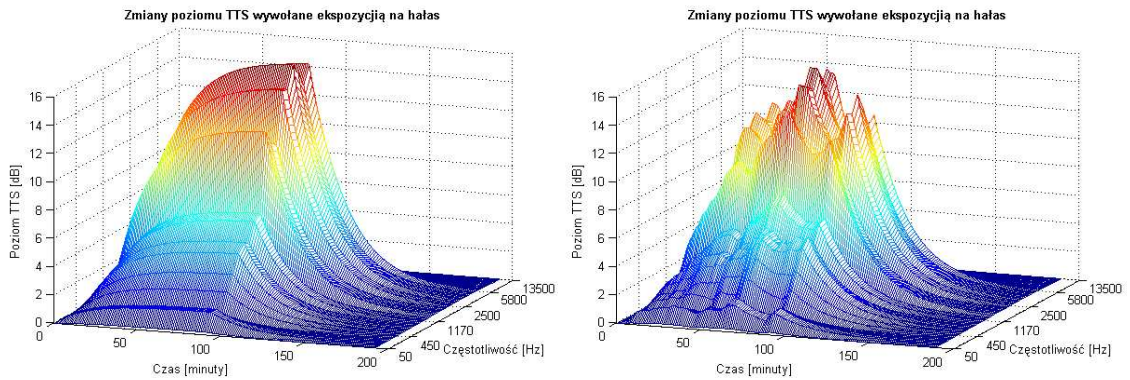
Rys. 4. Przebiegi czynnika strukturalnego dla wartości TTS z przedziału 21 – 42 dB

10.7. Załącznik 7

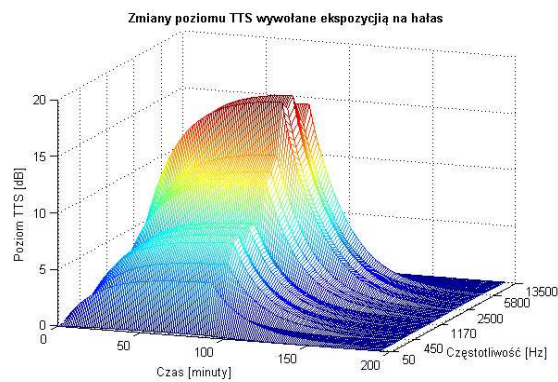
Komplet wyników symulacji wykonanych za pomocą Psychoakustycznego Dozymetru Hałasowego (PDH)



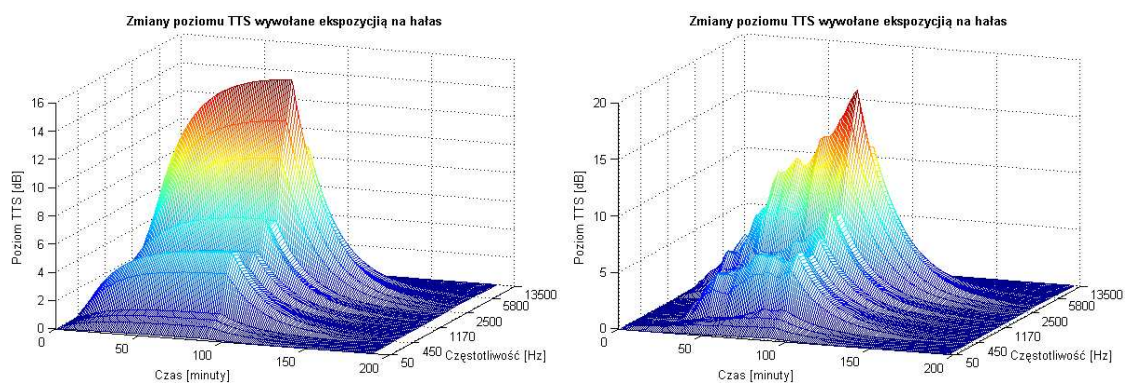
Rys. 1. Wynik symulacji dla klubu 1



Rys. 2. Wyniki symulacji dla klubu 2



Rys. 3. Wynik symulacji dla klubu 3



Rys. 4. Wyniki symulacji dla klubu 4

W tabelach poniżej zamieszczono wyniki symulacji otrzymanych za pomocą algorytmu PDH. Częstotliwość jest wyrażona w Hz, wartości TTS_2 oraz Max ATS w dB zaś czas T_R w minutach. Wyróżniono maksymalne wartości czasu T_R , potrzebnego na powrót słuchu do stanu początkowego.

Tabela 1. Wyniki analizy algorytmem PDH dla klubów 1 i 2. Analiza w oparciu o poziom równoważny

f	Klub 1			Klub 2		
	TTS_2	Max ATS	T_R	TTS_2	Max ATS	T_R
50	0,1	0,2	10	0,2	0,2	15
150	1,6	1,7	57	1,3	1,4	54
250	1,1	1,2	50	1,3	1,4	54
350	0,8	0,9	43	0,9	0,9	46
450	1,1	1,2	51	2,1	2,2	63
570	1,6	1,7	58	3,0	3,2	71
700	2,5	2,7	66	4,2	4,5	77
840	3,0	3,3	71	4,8	5,1	80
1000	3,2	3,5	72	4,5	4,8	79
1170	5,3	5,9	82	5,8	6,2	84
1370	5,9	6,5	84	6,1	6,5	85
1600	9,9	10,9	93	11,4	12,2	97
1850	8,5	9,3	91	10,5	11,2	95
2150	7,5	8,3	89	10,2	10,8	95
2500	9,3	10,3	93	13,6	14,5	101
2900	8,1	8,9	90	13,5	14,4	100
3400	8,6	9,5	92	14,9	15,9	102
4000	8,7	9,6	92	14,2	15,1	102
4800	8,0	8,8	90	13,2	14,1	100
5800	8,0	8,8	90	14,4	15,3	102
7000	2,7	3,0	69	8,3	8,8	91
8500	1,0	1,1	48	5,2	5,5	81
10500	0,2	0,2	15	1,7	1,8	59
13500	0,0	0,0	0	0,2	0,2	13

Tabela 2. Wyniki analizy algorytmem PDH dla klubów 3 i 4. Analiza w oparciu o poziom równoważny

f	Klub 3			Klub 4		
	TTS ₂	Max ATS	T_R	TTS ₂	Max ATS	T_R
50	0,2	0,2	15	0,1	0,1	8
150	4,3	4,6	78	0,7	0,7	41
250	2,7	2,9	68	1,0	1,1	48
350	1,9	2,0	61	1,2	1,3	51
450	5,1	5,5	81	3,6	3,9	74
570	6,6	7,1	86	4,8	5,2	80
700	7,0	7,5	88	4,6	5,1	79
840	5,9	6,3	84	3,5	3,8	74
1000	7,1	7,6	88	3,2	3,5	72
1170	7,3	7,8	88	4,0	4,4	76
1370	6,1	6,6	85	3,8	4,2	75
1600	10,2	11,0	95	5,8	6,4	84
1850	10,8	11,6	96	5,1	5,6	81
2150	12,0	12,8	98	5,3	5,8	82
2500	16,2	17,3	105	9,2	10,0	93
2900	15,5	16,6	104	11,4	12,5	97
3400	16,2	17,4	105	13,9	15,2	100
4000	14,4	15,4	102	11,6	12,7	97
4800	13,3	14,3	100	8,9	9,8	92
5800	14,8	15,8	103	9,0	9,8	92
7000	8,6	9,2	92	4,2	4,6	77
8500	5,0	5,4	81	2,5	2,7	67
10500	1,8	2,0	61	0,7	0,7	40
13500	0,2	0,2	15	0,1	0,1	0

Tabela 3. Wyniki analizy algorytmem PDH dla klubów 2 i 4. Analiza w oparciu o historię poziom równoważny dla przedziałów 1 minutowych

f	Klub 2			Klub 4		
	TTS ₂	Max ATS	T_R	TTS ₂	Max ATS	T_R
50	0,2	0,6	14	0,2	0,4	17
150	1,2	4,5	52	0,8	1,7	44
250	1,3	5,7	54	1,2	2,3	53
350	1,0	4,1	48	1,7	3,9	59
450	2,1	7,7	63	4,7	8,5	79
570	3,1	8,7	71	5,8	10,4	83
700	4,4	9,5	78	5,7	11,3	83
840	4,9	10,8	80	5,0	9,5	81
1000	4,3	11,4	78	5,0	9,2	81
1170	5,3	13,7	82	6,1	11,4	85
1370	5,6	13,8	83	5,7	11,2	83
1600	10,4	20,5	95	8,0	14,9	90
1850	9,2	20,1	93	7,0	13,4	87
2150	8,5	20,5	91	7,2	13,4	88
2500	11,5	25,3	97	11,0	19,2	96
2900	11,3	26	97	13,7	21,2	101
3400	12,4	28,4	98	16,3	24,3	106

4000	11,3	28,2	97	13,9	22,2	101
4800	10,0	27,3	95	11,2	19,8	97
5800	10,5	29,2	95	11,0	20,5	96
7000	6,1	21,5	85	5,6	13	83
8500	4,0	16,9	76	3,6	9,3	74
10500	1,6	9,3	58	1,1	3,8	51
13500	0,2	2,2	20	0,1	0,5	5

Tabela 4. Wyniki analizy algorytmem PDH dla sygnału hałasu prezentowanego w warunkach laboratoryjnych

f	Historia poziomów			Oryginalna postać czasowa		
	TTS ₂	Max ATS	T_R	TTS ₂	Max ATS	T_R
50	0,0	0,0	0	0,0	0	0
150	0,0	0,0	0	0,0	0	0
250	0,0	0,0	0	0,0	0	0
350	0,0	0,0	0	0,0	0	0
450	0,0	0,0	0	0,0	0	0
570	0,0	0,0	0	0,0	0	0
700	0,0	0,0	0	0,0	0	0
840	0,0	0,0	0	0,0	0	0
1000	0,0	0,1	0	0,2	0,5	12
1170	0,1	0,2	7	0,5	1,2	33
1370	0,2	0,3	17	0,6	1,4	38
1600	0,8	1,2	44	1,7	3,8	59
1850	1,7	2,5	59	2,3	5,2	65
2150	2,5	3,7	67	3,2	6,5	72
2500	4,6	6,9	79	6,2	11	85
2900	6,8	10,2	87	8,1	14,4	90
3400	9,5	14,4	94	10,4	18,2	95
4000	11,1	16,8	97	11,1	18,7	97
4800	11,5	17,3	97	11,3	18,7	97
5800	12,6	19,0	98	13,2	21,4	99
7000	6,9	10,3	87	4,1	7,1	76
8500	1,6	2,4	57	0,9	1,6	45
10500	0,2	0,3	19	0,1	0,3	9
13500	0,0	0,0	0	0,0	0	0