



OSKA

Ogólnopolska Studencka
Konferencja Akustyków

27-30.03 2025

Warszawa

Artykuły recenzowane

Studium badawcze
młodych akustyków 2025

Artykuły recenzowane
Studium badawcze młodych akustyków 2025

Wydawnictwo konferencyjne Ogólnopolska Studencka Konferencja Akustyków
OSKA 2025

Komitety Naukowe:

dr inż. Agnieszka Paula Pietrzak
dr hab. inż. Artur Janicki, prof. PW
dr hab. inż. Tomasz Zieliński
dr Rafał Bielas
dr inż. Aleksandra Chojak
dr inż. Bartłomiej Chojnacki
dr Przemysław Danowski
dr inż. Paweł Dziechciński
dr inż. Maciej Jasiński
dr inż. Piotr Kozłowski
dr inż. Marcin Lewandowski
dr inż. Michał Łuczyński
dr inż. Karolina Marciniuk
dr inż. Dorota Młynarczyk
dr inż. Mateusz Modrzejewski
dr inż. Bartłomiej Mróz
dr inż. Anna Ostaszewska-Liżewska
dr inż. Przemysław Plaskota
dr Bartosz Przysucha
dr inż. Grzegorz Szczepański
dr inż. Marcin Zastawnik

Opracowanie i projekt okładki: Aleksandra Gątarczyk, Łukasz Pokorzyński, Katarzyna Stec

Wspierają nas

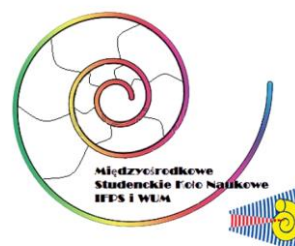


Patroni

MusicTech Poland



Organizatorzy



Partnerzy Wydarzenia



SAMSUNG



www.oska-konferencja.pl

Stowarzyszenie Producentów Silikatów „Białe murowanie”

Stowarzyszenie Producentów Silikatów „Białe murowanie” powstało w 2012 roku i od tego czasu działa na rzecz upowszechniania wiedzy dotyczącej produkcji i zastosowania wyrobów silikatowych w budownictwie oraz ich wpływu na środowisko naturalne.



We współpracy z najbardziej uznanymi ekspertami Stowarzyszenie wydaje publikacje poświęcone najważniejszym wymaganiom, jakie powinny spełniać budynki. Dotychczas ukazały się: „Izolacyjność od dźwięków powietrznych i uderzeniowych. Regulacje prawne, obliczenia i rozwiązania konstrukcyjne na przykładzie ścian z silikatów”, autorstwa dr. Leszka Dulaka, „Oszczędność energii i ochrona cieplna. Regulacje prawne, obliczenia i rozwiązania konstrukcyjne na przykładzie ścian z silikatów”, autorstwa prof. Dariusza Bajno oraz „Mury skrępowane z elementów silikatowych”, autorstwa prof. Łukasza Drobca.



Stowarzyszenie współpracuje z kołami naukowymi studentów i doktorantów, regularnie wspierając wydarzenia przez nie organizowane. Ponadto, eksperci Stowarzyszenia co roku biorą udział w konferencjach studenckich.

SAMSUNG

Samsung R&D Institute Poland jest jednym z największych centrów badawczo-rozwojowych w Polsce. W ramach prac prowadzonych w ośrodku powstaje wysokiej jakości oprogramowanie dla produktów Samsung Electronics, które znajduje się w topowych produktach marki, zwłaszcza w smartfonach i telewizorach, które trafiają do użytkowników na całym świecie. W centrum projektowane i wdrażane są rozwiązania z takich obszarów, jak AI, multimedia, serwisy w chmurze, analityka danych, bezpieczeństwo IT czy technologie internetu rzeczy. Centrum specjalizuje się w zagadnieniach związanych z algorytmami sztucznej inteligencji, uczeniem maszynowym, analizą dźwięku i mowy, przetwarzaniem obrazu i języka naturalnego oraz analityką danych i bezpieczeństwem informacji. Współtworzona jest tutaj usługa głosowa Bixby, platforma Tizen, usługi płatności mobilnych, Samsung Wallet, usługi mobile-health, system optymalizacji gier mobilnych oraz Samsung Cloud. W obszarze badań nad technologiami sztucznej inteligencji, jako jeden z największych zespołów AI w Europie centrum zajmuje się technologiami i algorytmami wykorzystywanymi m.in. przy tworzeniu systemów rekomendacyjnych czy nawigacyjnych, jest również jednym z wiodących ośrodków specjalizujących się w przetwarzaniu języka naturalnego, w szczególności w zakresie tłumaczenia maszynowego, agentów dialogowych oraz szeroko pojętej analityki tekstu. Tworzone jest tutaj także oprogramowanie na urządzenia do odbioru telewizji cyfrowej najnowszej generacji oraz panele wielkoformatowe. Ważnym elementem i obszarem prowadzonych badań są prace związane z projektowaniem, tworzeniem i testowaniem rozwiązań dla sieci dostępowej i szkieletowej w technologii 5G w oparciu o najnowsze rozwiązania chmurowe.



Spis Treści



Anna Celińska – Projekt adaptacji akustycznej sali seminaryjnej.....	6
Anna Frączkowska – Badanie skuteczności działania indywidualnych ochronników słuchu.....	18
Paweł Kabala – Ocena wierności auralizacji nagrań sygnałów instrumentów muzycznych.....	30
Sara Kopeć – Badanie możliwości zastosowania wielokomórkowych metamateriałów membranowych do zwiększania izolacyjności akustycznej.....	43
Agata Maciuszek – Projektowanie i analiza dźwiękoizolacyjnych metamateriałów akustycznych typu soft solid z wtrąceniami periodycznymi.....	56
Klaudia Piątek – Nagrania binauralne jako pomoc w rozwoju orientacji przestrzennej.....	67
Jakub Tokarski – Pomiar indywidualnych funkcji HRTF w warunkach bezpogłosowych.....	78

Anna CELIŃSKA¹,

Projekt i realizacja adaptacji akustycznej rzeczywistego pomieszczenia w celu spełnienia określonych wymagań

Planning and implementation of acoustic adaptation for a real-life space to meet defined requirements

¹ Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych,
Politechnika Warszawska
acelinska372@gmail.com

Streszczenie

W referacie przedstawiono projekt adaptacji akustycznej sali seminaryjnej Instytutu Radioelektroniki i Technik Multimedialnych na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Celem pracy było dostosowanie parametrów akustycznych pomieszczenia do wymagań normy PN-B-02151-4, zapewniając odpowiednie warunki do prowadzenia zajęć dydaktycznych. W pierwszym etapie przeprowadzono rejestrację odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, co umożliwiło ocenę zastanych warunków akustycznych. Na podstawie wyników czasu pogłosu (T_{30}) skalibrowano model akustyczny pomieszczenia opracowany w programie symulacyjnym Odeon. Adaptacja akustyczna opierała się na rozwiązaniach, które nie ingerowały w konstrukcję budowlaną obiektu, takich jak instalacja paneli sufitowych, pokrycie podłogi wykładziną oraz zastosowanie absorberów naściennych. Na podstawie obliczeń modelu wyznaczono i przeanalizowano cztery kluczowe parametry akustyczne: czas pogłosu (T_{30}), współczynnik zrozumiałości mowy (STI), czas wczesnego zaniku (EDT) oraz czytelność dźwięku (C_{50}). Ocena tych parametrów przed i po adaptacji potwierdziła skuteczność zaproponowanych rozwiązań, które spełniły zarówno wymagania normatywne, jak i zalecenia literaturowe w zakresie akustyki wnętrz.

1 Wstęp

Odpowiednia akustyka wnętrz odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu komfortowych warunków do komunikacji i pracy. W szczególności w pomieszczeniach edukacyjnych, takich jak sale seminaryjne, właściwa adaptacja akustyczna wpływa na zrozumiałość mowy oraz komfort słuchaczy i prowadzących. Motywacją do przeprowadzenia niniejszej pracy była potrzeba dostosowania akustyki sali seminaryjnej do normatywnych wymagań,

aby oprawić warunki prowadzenia zajęć. Wykonanie pomiaru rzeczywistego parametrów akustycznych umożliwia skalibrowanie parametrów modelu symulacyjnego, aby jak najdokładniej odwzorowywał warunki panujące w sali. Analiza obiektywnych parametrów akustycznych pozwala na opracowanie skutecznych i nieinwazyjnych rozwiązań adaptacyjnych, mających na celu zmniejszenie czasu pogłosu oraz poprawę czytelności i zrozumiałości mowy. Adaptacja akustyczna powinna spełniać wymagania opisane w normie PN-B-02151-4, która określa kryteria dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach edukacyjnych.

2 Ocena akustyki pomieszczenia

Podczas realizacji zdecydowano na porównanie czterech obiektywnych parametrów: czasu pogłosu (T_{30}), współczynnika zrozumiałości mowy (STI), czasu wczesnego zaniku (EDT) oraz czytelności mowy (C_{50}).

Czas pogłosu (ang. *Reverberation Time, RT*) jest czasem, który upłynął od momentu wyłączenia źródła dźwięku do momentu, w którym poziom natężenia dźwięku zmaleje o 60 dB względem poziomu wyjściowego.[1].

Pomiar czasu pogłosu w rzeczywistych warunkach utrudnia szum tła, dlatego standardowo wykonuje się je na mniejszych zakresach tłumienia, mierząc czas pogłosu między poziomami -5 dB i -35 dB lub -5 dB i -25 dB.

Współczynnik zrozumiałości mowy (ang. *Speech Transmission Index, STI*) jest parametrem służącym do oceny jakości przekazu mowy w różnych warunkach akustycznych. W trakcie rzeczywistego pomiaru emituje się dźwięk o paśmie częstotliwości zbliżonym do mowy ludzkiej, a następnie analizuje się zmiany głębokości modulacji. Wyniki pozwalają ocenić zrozumiałość mowy w danej przestrzeni, uwzględniając wpływ pogłosu, hałasu tła oraz właściwości akustycznych pomieszczenia.

Czas wczesnego zaniku (ang. *Early Decay Time, EDT*) to parametr określający czas, w którym poziom dźwięku zmniejsza się od 0 do -10 dB po wyłączeniu źródła dźwięku, wyrażany w sekundach. Zarówno czas pogłosu, jak i czas wczesnego zaniku służą do określania pogłosowości pomieszczenia.

Czytelność mowy, określoną także jako współczynnik przejrzystości (ang. *Clarity*, C) wyznacza się jako logarytmiczny stosunek energii dźwięku we wczesnym okresie (pierwsze 50 ms) do energii dźwięku w późniejszym okresie (po 50 ms).

3 Wymagania adaptacji

Sale lekcyjne są zaprojektowane z myślą o prowadzeniu zajęć, w których głównym środkiem przekazywania wiedzy jest komunikacja werbalna, czyli mowa. Właściwa akustyka takich pomieszczeń odgrywa kluczową rolę, zapewniając sprzyjające warunki do nauki i pracy. W normie PN-B-02151-4:2015-06 [3] zostały określone wymagania dotyczące czasu pogłosu oraz współczynnika zrozumiałości mowy. Kryteria dotyczące czasu wczesnego zaniku i czytelności mowy zostały wybrane, bazując na literaturze związanej z akustyką wnętrz.

Według normy [3] wymagania dotyczące **czasu pogłosu** (T_{30}) powinny być spełnione w każdym z pasm oktaowych o środkowych częstotliwościach: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz i osiągać zbliżone wartości. Zostały sklasyfikowane na podstawie rodzaju pomieszczenia oraz jego objętości. Zalecane wartości czasu pogłosu dla sali edukacyjnej zostały przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1: Wymagana wartość T_{30} [s] - czasu pogłosu określona w normie dla sali o określonym typie i kubaturze.

Rodzaj pomieszczenia	Objętość pomieszczenia	Wymagana wartość parametru
Sala edukacyjna	$120 \text{ m}^3 < V < 250 \text{ m}^3$	$T_{30} \leq 0,6 \text{ s}$

Współczynnik zrozumiałości mowy (STI) powinien spełniać następujący warunek opisany w Tabeli 2.

Tabela 2: Wymagana wartość STI - współczynnika zrozumiałości mowy określona w normie dla sali o określonym typie i kubaturze.

Rodzaj pomieszczenia	Objętość pomieszczenia	Wymagana wartość parametru
Sala edukacyjna	$120 \text{ m}^3 < V < 250 \text{ m}^3$	$STI \geq 0,60$

Wartości STI, przedstawione w normie PN-B-02151-4 [3], skorelowane są z subiektywną oceną zrozumiałości mowy, zależność przedstawiona jest w Tabeli 3.

Tabela 3: Zależność między oceną jakości dźwięku a wartością STI - współczynnika zrozumiałości mowy.

Jakość dźwięku	Współczynnik zrozumiałości mowy STI
Zła	0 - 0,30
Słaba	0,30 - 0,45
Zadowalająca	0,45 - 0,60
Dobra	0,60 - 0,75
Doskonała	0,75 - 1,00

W poradniku dotyczącym normy [4] zostały podane minimalne współczynniki pochłaniania dźwięku dla sufitu, spełniające wymagania normy [3]. Wyszczególnione zostały w Tabeli 4.

Tabela 4: Minimalne wartości współczynników pochłaniania dźwięku dla sufitu, spełniające wymagania normy dla typowych sal szkolnych.

Powierzchnia [m ²]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
40	0,32	0,54	0,57	0,59	0,60	0,53

L.G Marshall zdefiniował skalę pozwalającą ocenić zrozumiałość mowy na podstawie **czytelności dźwięku** (C_{50}) [5], przedstawioną w poniższej Tabeli 5. Aby uzyskać ponad dobrą zrozumiałość mowy po adaptacji, oczekiwanym wynikiem współczynnika jest 5 dB.

Tabela 5: Zależność między oceną zrozumiałości mowy a wartością C_{50} - czytelnością dźwięku.

Zrozumiałość mowy	Ważony współczynnik przejrzystości C_{50} [dB]
Doskonała	≥ 7
Dobra	[2; 7)
Średnia	[-2; 2)
Słaba	[-7; -2)
Zła	≤ -7

W normie nie zostały określone jednoznaczne wymagania dotyczące **czasu wczesnego zaniku** (EDT) dla sal o przeznaczeniu edukacyjnym. Parametr ten jest skorelowany z czasem pogłosu, a więc oczekiwano znaczącego obniżenia oraz wyników zbliżonych do czasu pogłosu po zastosowaniu adaptacji.

4 Charakterystyka pomieszczenia

Wybrane pomieszczenie - sala 557 (Rysunek 1), znajduje się na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Pomieszczenie, usytuowane na piątym piętrze, wcześniej pełniło funkcję biblioteki, a obecnie jest wykorzystywane jako sala seminaryjna. Niestety, nie zostało ono odpowiednio przystosowane pod względem akustycznym do prowadzenia zajęć. Rozmowy i dyskusje prowadzone w tym pomieszczeniu były trudne do odbioru, ze względu na dużą pogłosowość sali. Słuchacz przebywający w tym pomieszczeniu nie był w stanie skupić się na sensie wypowiedzi, ponieważ doskwierało mu wrażenie echa. Niekorzystne warunki akustyczne w salach edukacyjnych mają znaczący wpływ na jakość pracy w nich. Głos prowadzącego jest nadwyreżany, gdy występuje tło akustyczne związane z aktywnością uczniów. [?] Studenci i prowadzący decydujący się na uczestniczenie w zajęciach powinni mieć zapewniony komfort przebywania i zrozumiałość mowy, aby móc efektywnie pracować w takim pomieszczeniu.



Rysunek 1: Zdjęcia sali 557

Pomieszczenie, choć stosunkowo niewielkie, mogłoby stanowić odpowiednią przestrzeń do prowadzenia zajęć dla niewielkiej grupy studentów (12 osób i prowadzący), pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej akustyki. Jego układ i charakter są typowe dla innych pomieszczeń na tym samym piętrze budynku. Podłoga oraz niewielki parapet przy oknie wyłożone są płytkami ceramicznymi, natomiast ściany nośne wykonane są z betonu, otynkowane i pomalowane. Jedna ze ścian jest ścianą działową, także otynkowaną i pomalowaną. Większość jednej ze ścian pomieszczenia stanowią okna, zapewniające dostęp do naturalnego światła. W pomieszczeniu znajdują się dwa rodzaje drzwi wewnętrznych: przeciwpożarowe wejściowe oraz dodatkowe drewniane drzwi wewnętrzne.

Wnętrze posiada dwie szafki z książkami w rogu, a centralnym elementem przestrzeni jest długi drewniany stół, wokół którego rozmieszczono tapicerowane materiałem krzesła. Dodatkowo sala jest wyposażona w klimatyzator, projektor, kaloryfery, małą tablicę.

5 Realizacja adaptacji

Pomiar wymiarów pomieszczenia wykonano za pomocą dalmierza - Bosch Professional Dalmierz laserowy GLM 40. Do stworzenia trójwymiarowego modelu pomieszczenia wykorzystano oprogramowanie SketchUp Make 2017. Do przeprowadzenia analizy i adaptacji akustycznej pomieszczenia wykorzystano oprogramowanie Odeon Combined.

Aby możliwa była kalibracja modelu symulacyjnego, konieczne było przeprowadzenie rzeczywistych pomiarów parametrów akustycznych. Pozwoliło to na zweryfikowanie poprawności przyjętych współczynników pochłaniania dźwięku dla materiałów zastosowanych w sali. Dzięki kalibracji możliwe było dokładne odwzorowanie rzeczywistych warunków akustycznych. Tym samym dalsze obliczenia zostały dostosowane do rzeczywistych parametrów przestrzeni, co zapewniało ich zgodność z warunkami zastanymi w sali i umożliwiało skuteczne zaplanowanie działań adaptacyjnych.

Rejestrację odpowiedzi impulsowej przeprowadzono zgodnie z metodyką pomiarową opisaną w normie PN-EN ISO 3382 [2]. Układ pomiarowy składał się z następujących elementów:

- wszechkierunkowego źródła dźwięku - Brüel & Kjaer OmniPower Sound Source Type 4292-L,
- mikrofonu - Brüel & Kjaer Type 4189,
- wzmacniacza - Brüel & Kjaer Power Amplifier Type 2734,
- interfejsu audio USB - PreSonus AudioBox GO,
- oprogramowania Easera v1.2.18 do rejestracji i przetwarzania odpowiedzi impulsowej.

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem wyżej wymienionego sprzętu, zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie [2]. Źródło dźwięku umieszczono w trzech różnych miejscach, a dla każdego z tych położeń czterokrotnie zmieniono lokalizację odbiornika. Dzięki temu możliwe było pełne zarejestrowanie odpowiedzi impulsowej w całym pomieszczeniu. Aby zapewnić identyczne warunki jak te pomiarowe, w programie Odeon zdefiniowano źródła i odbiorniki w tych samych miejscach.

Do wykonania symulacji i obliczenia parametrów akustycznych w programie Odeon niezbędne jest zdefiniowanie materiałów, z jakich wykonane są powierzchnie. Mają one różne właściwości odbijające, pochłaniające bądź rozpraszające, które definiują zachowanie się fali dźwiękowej w pomieszczeniu. Dobranie odpowiednich współczynników ma decydujący wpływ na poprawne odwzorowanie akustyki rzeczywistego pomieszczenia. W Tabeli 6 znajduje się spis wszystkich powierzchni zawartych w modelu, ich powierzchnia oraz odpowiednio przypisane im współczynniki pochłaniania dźwięku.

Tabela 6: Współczynniki pochłaniania dla danej powierzchni i częstotliwości.

Nazwa powierzchni	Pow. [m ²]	Współczynnik pochłaniania dla częstotliwości [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Parapet	7,68	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Podłoga	33,72	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Drzwi 1	2,05	0,16	0,14	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
Drzwi 2	1,86	0,26	0,24	0,18	0,13	0,10	0,09	0,09	0,09
Belka	12,92	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
Sufit	36,54	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
Ściany nośne	36,31	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
Ściana działowa	17,22	0,14	0,12	0,10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
Okna	11,64	0,10	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01
Stół	5,70	0,13	0,15	0,16	0,18	0,12	0,12	0,12	0,12
Krzesła	5,46	0,28	0,41	0,50	0,60	0,75	0,80	0,76	0,47
Szafa	4,87	0,11	0,25	0,34	0,45	0,50	0,58	0,60	0,55

Następnie porównano wyniki parametrów z pomiaru rzeczywistego oraz z symulacji. Poniżej w Tabelach 7, 8, 9, 10 przedstawione są uśrednione wartości dla wszystkich źródeł i odbiorników uzyskane podczas pomiaru i symulacji oraz różnica między tymi metodami. Różnice mniejsze niż 10 % wartości wskazują na poprawność dobrania współczynników materiałów w modelu oraz poprawne odwzorowanie warunków rzeczywistych.

Tabela 7: Porównanie średniego T_{30} - czasu pogłosu [s] dla pomiaru i średniej wartości z wykorzystaniem pełnego modelowania w zależności od częstotliwości [Hz].

	Częstotliwość [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pomiar	1,8	1,5	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
Symulacja	1,7	1,4	1,3	1,3	1,1	1,1	1,0	0,8
Różnica	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0

Tabela 8: Porównanie średniego STI - współczynnika zrozumiałości mowy dla pomiaru i średniej wartości z wykorzystaniem pełnego modelowania w zależności od płci.

	Wartość	
	Kobieta	Mężczyzna
Pomiar	0,59	0,59
Symulacja	0,58	0,57
Różnica	0,01	0,02

Tabela 9: Porównanie średniego EDT - czasu wczesnego zaniku [s] dla pomiaru i średniej wartości z wykorzystaniem pełnego modelowania w zależności od częstotliwości [Hz].

	Częstotliwość [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pomiar	1,4	1,3	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
Symulacja	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,8
Różnica	-0,3	-0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 10: Porównanie średniego C_{50} - czytelności dźwięku [dB] dla pomiaru i średniej wartości z wykorzystaniem pełnego modelowania w zależności od częstotliwości [Hz].

	Częstotliwość [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pomiar	-2,0	-1,6	-1,8	-1,1	-0,1	0,1	0,6	2,0
Symulacja	-3,1	-1,7	-1,4	-1,0	-0,3	-0,1	0,4	1,9
Różnica	1,1	0,1	-0,4	-0,0	0,2	0,2	0,2	0,1

6 Adaptacja akustyczna

Aby spełnić wymagania opisane w normie PN-B 02151-4 [3] oraz przedstawione w akapicie 5, konieczne było przeprowadzenie adaptacji akustycznej pomieszczenia, tak aby dostosować je do standardów obowiązujących w salach edukacyjnych.

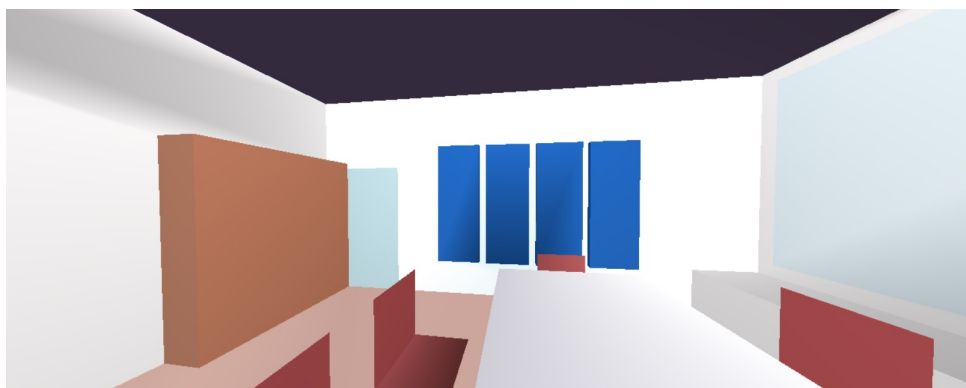
Przy wyborze metod adaptacji akustycznej szczególną uwagę zwrócono na rozwiązania skuteczne w redukcji czasu pogłosu, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości. Ze względu na charakter pomieszczenia jako obiektu rzeczywistego, priorytetem było zastosowanie metod nieinwazyjnych, które nie ingerują w istniejącą konstrukcję budowlaną, aby uniknąć potencjalnych trudności technicznych lub wysokich kosztów. Postanowiono wybrać rozwiązania proste i ekonomiczne, które ostatecznie pozwolą osiągnąć wymagane parametry akustyczne.

Na podstawie wytycznych przedstawionych w poradniku firmy OWA [4] zdecydowano się na pokrycie powierzchni innymi rodzajami materiałów. Pokrycie wysoko odbijających płytek ceramicznych materiałem wykładzinowym zredukowało czas pogłosu w całym paśmie częstotliwości. W kolejnym etapie skupiono się na adaptacji sufitu, zastosowano panele sufitowe pochłaniające dźwięk dostarczane przez firmę OWA, co pozwoliło na dalszą redukcję czasu pogłosu oraz dostosowanie parametrów akustycznych do wymagań przedstawionych w tabeli 4. Pomimo tych działań, czas pogłosu w pomieszczeniu wciąż przekraczał wymagane wartości. W związku z tym, jako dodatkowe rozwiązanie, zaproponowano pokrycie jednej ze ścian pomieszczenia absorberami na powierzchni wynoszącej od 20% do 50% całkowitej powierzchni ściany. Taki zabieg miał na celu redukcję odbić dźwięku od pustej ściany, które mogły powodować powstawanie echa odbitego.

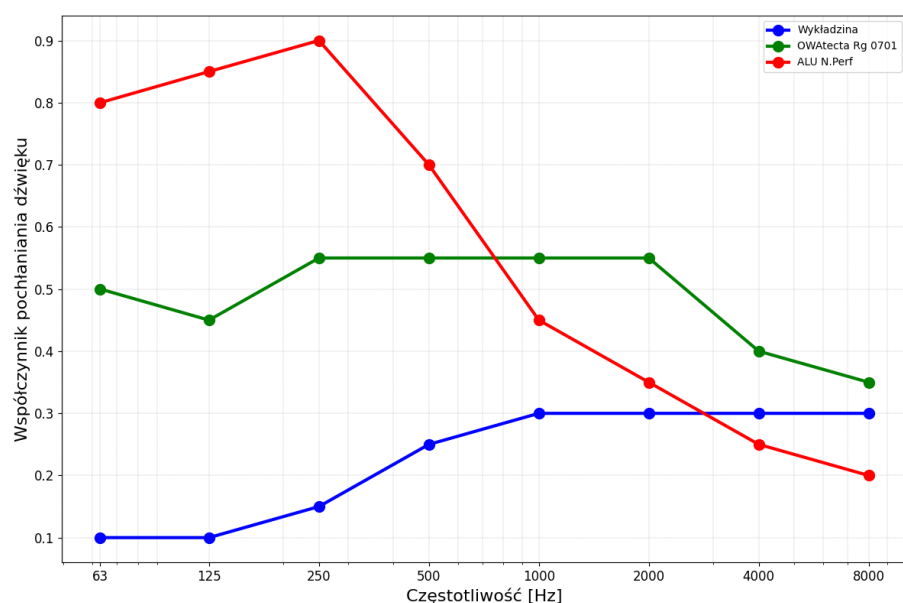
Dokonano wyboru następujących materiałów:

- Materiał wykładzinowy, dane dotyczące parametrów materiału zaczerpnięto z forum akustycznego [6].
- Płyty sufitowe z okrągłą, regularną mikroperforacją, lakierowane proszkowo na kolor biały, spełniające wymagania podane w Tabeli 4. Model OWAtecta Rg 0701, klasa pochłaniania D, wysokość podwieszenia 400mm; wyróżnione w poradniku [4].
- Absorbery naścienne WALLBOARD ALU N.Perf o grubości 90 mm i rozmiarze: 1794 mm × 649 mm; wyróżnione w poradniku [4].

Do geometrii dodano powierzchnie czterech absorberów naściennych (przedstawione na Rysunku 2) i zmieniono współczynniki pochłaniania wyżej wymienionych powierzchni. Wykres współczynników pochłaniania dźwięku materiałów wybranych do adaptacji przedstawiono na Rysunku 3.



Rysunek 2: Zrzut ekranu z programu Odeon przedstawiający dodane podczas adaptacji powierzchnie.



Rysunek 3: Współczynniki pochłaniania dźwięku wykorzystanych materiałów do adaptacji akustycznej pomieszczenia w zależności od częstotliwości [Hz].

Zastosowanie materiałów silnie pochłaniających pozwoliło na uzyskanie oczekiwanych rezultatów. Spełniono wymagania dotyczące zmniejszenia czasu pogłosu oraz zwiększenia STI do wartości opisanych w normie. Poniżej zobrazowano rezultaty w Tabelach 11, 12, 13, 14 prezentujących średnie wartości parametrów dla wszystkich źródeł i odbiorników przed i po adaptacji akustycznej. Na Rysunku 4 znajdują się wykresy obrazujące skalę zmiany danych parametrów.

Tabela 11: Porównanie średniego T_{30} - czasu pogłosu [s] przed i po adaptacji w zależności od częstotliwości [Hz].

	Częstotliwość [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Przed	1,7	1,4	1,3	1,3	1,1	1,1	1,0	0,8
Po	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5

Tabela 12: Porównanie średniego STI - współczynnik zrozumiałości mowy dla pomiaru przed i po adaptacji w zależności od płci.

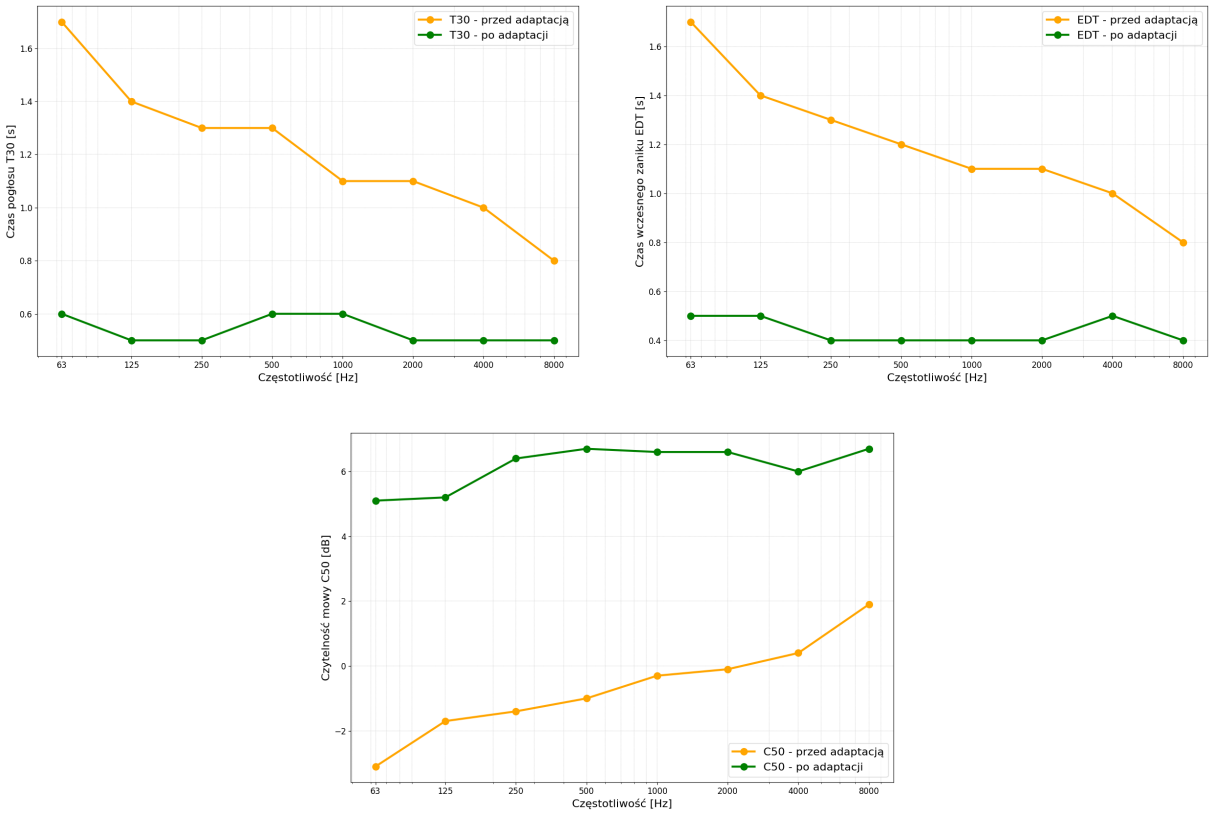
	Wartość	
	Kobieta	Mężczyzna
Przed	0,58	0,57
Po	0,76	0,75

Tabela 13: Porównanie średniego EDT - czasu wczesnego zaniku [s] przed i po adaptacji w zależności od częstotliwości [Hz].

	Częstotliwość [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Przed	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,8
Po	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4

Tabela 14: Porównanie średniego C_{50} - czytelności dźwięku [dB] przed i po adaptacji w zależności od częstotliwości [Hz].

	Częstotliwość [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Przed	-3,1	-1,7	-1,4	-1,0	-0,3	-0,1	0,4	1,9
Po	5,1	5,2	6,4	6,7	6,6	6,6	6,0	6,7



Rysunek 4: Wykresy średnich wartości porównywanych paramterów w zależności od częstotliwości dla symulacji przed i po adaptacji.

7 Podsumowanie

Projekt adaptacji spełnił wymagania opisane w normie [3] i literaturze i ostatecznie poprawia warunki akustyczne w sali. Podsumowując, średnie wartości parametrów po adaptacji spełniają założenia przedstawione w akapicie 3. Średnie czasy pogłosu (T_{30}) są mniejsze bądź równe 0,6 s, adaptacja pozwoliła zmniejszyć średni czas pogłosu o nawet 1 s. Współczynnik zrozumiałości mowy (STI) spełnił wymóg i osiągnął wartość ponad 0,75, co zgodnie z wymaganiami z Tabeli 3 świadczy o doskonałej, a w kilku przypadkach dobrej jakości dźwięku. Przed adaptacją wartość ta wskazywała na tylko zadowalającą jakość dźwięku. Czas wczesnego zaniku (EDT) uległ istotnemu obniżeniu, uzyskane wyniki zbliżają się do optymalnych czasów pogłosu, co można interpretować jako równowagę między pochłanianiem a rozpraszaniem dźwięku. Czytelność dźwięku C_{50} osiągnęła wartość powyżej 5 dB. Zgodnie z Tabelą 5 nastąpiła zmiana słabej lub średniej zrozumiałości mowy na ponad dobrą.

Literatura

- [1] Ken Pohlmann F. Alton Everest, Master Handbook of Acoustics Seventh Edition, McGraw-Hill Education, 2021
- [2] PN-EN ISO 3382-1: Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 1: Pomieszczenia specjalne, 2009
- [3] PN-B-02151-4:2015-06: Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach - Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań, 2015
- [4] Andrzej Krzysztof Kłosak Grzegorz Korytowski Marek Stachyra, Akustyka wewnątrz poradnik. Norma PN-B 02151-4 Jej wymagania i jak je spełnić, OWA Polska, 2021
- [5] L. Marshall, An Acoustics Measurement Program for Evaluating Auditoriums Based on the Early/Late Sound Energy Ratio, Journal of the Acoustical Society of America, 1996
- [6] Acoustic Group, Absorption Coefficients of Various Materials, https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf

Anna FRĄCZKOWSKA¹,

BADANIE SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA INDYWIDUALNYCH OCHRONNIKÓW SŁUCHU

THE RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF INDIVIDUAL HEARING PROTECTORS

¹ Politechnika Wrocławska

anna.m.frackowska@gmail.com

Streszczenie

Celem pracy jest zbadanie skuteczności działania indywidualnych ochronników słuchu, a dokładniej pasywnych wkładek przeciwhałasowych. Opracowano dwie metody badawcze, które miały na celu ocenę tłumienia ochronników w sposób obiektywny i subiektywny. Podstawowym parametrem, który zbadano jest tłumienie wkładki obliczane jako algebraiczna różnica wartości zmierzonej bez ochronnika i z ochronnikiem. W celu realizacji pomiarów obiektywnych zastosowano dwa sygnały pomiarowe: szum różowy filtrowany pasmami tercjowymi oraz sygnał sinusoidalny. Pomiary obiektywne wykonano przy użyciu fantomu sztucznej głowy, który umożliwił właściwe umieszczenie wkładki w kanale. Pomiary subiektywne zrealizowano jako badania audiometryczne wykorzystując standardowe sygnały sinusoidalne, zgodnie z normą dotyczącą tego typu pomiarów. Uzyskane wyniki wykazały duże rozbieżności dla metody obiektywnej i obu rodzajów sygnałów pomiarowych między sobą, natomiast wyniki badań subiektywnych wykazały rezultaty najbardziej zbliżone do wartości podawanych przez producentów ochronników.

1 Wstęp

Według Światowej Organizacji Zdrowia ponad 450 milionów ludzi na całym świecie cierpi na problemy ze słuchem [2]. Współcześnie coraz większym wyzwaniem staje się problem nadmiernej ekspozycji na hałas o wysokim natężeniu. Dotyczy to zarówno osób regularnie słuchających muzyki, korzystających ze słuchawek, które emitują fale dźwiękowe bezpośrednio do wnętrza kanału słuchowego. Dodatkowo, częste uczestnictwo w koncertach i wydarzeniach muzycznych może wiązać się z narażeniem na ekstremalne poziomy dźwięku, które niejednokrotnie osiągają wartości rzędu 140 dB SPL [5]. Warto również nadmienić, że na niektórych stanowiskach pracy również można doświadczyć wy-

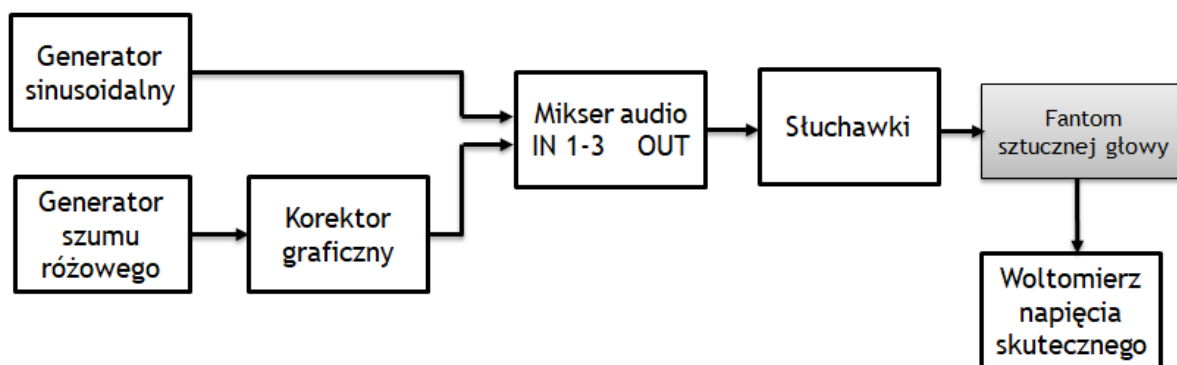
sokich poziomów hałasu. Tego rodzaju intensywne bodźce akustyczne mogą prowadzić do stopniowego uszkodzenia elementów układu słuchowego, a w konsekwencji – do nieodwracalnej utraty słuchu. W celu zapewnienia większej ochrony zarówno na stanowisku pracy, ale również podczas wszelkich wydarzeń muzycznych, powstały indywidualne ochronniki słuchu. Wśród nich wyróżniamy nauszniki przeciwhałasowe oraz wkładki przeciwhałasowe. W ostatnim czasie coraz częściej można spotkać aktywne ochronniki słuchu, które działają na zasadzie emisji sygnału o fazie przeciwnej do hałasu. Efektywność ich tłumienia zależy od wielu czynników, takich jak zastosowany algorytm odwracania fazy, rodzaj materiału, z którego wykonano ochronnik, a także charakterystyka samego hałasu. W niniejszej pracy skoncentrowano się jednak wyłącznie na wkładkach pasywnych, których skuteczność tłumienia można analizować zarówno jako tłumienie ekranu akustycznego, jak i tłumienność wtrąceniową, polegającą na wprowadzeniu do środowiska materiału o odmiennej impedancji akustycznej, co jest zbliżone do metod stosowanych w pomiarach teletransmisyjnych [8]. Przyjęcie jako miary skuteczności tłumienności wtrąceniowej pozwoliłoby na optymalizację tłumienia już na drodze wyboru lub zmiany struktury materiału, z którego wykonuje się wkładki. Najważniejszym parametrem ochronników słuchu jest tłumienie dźwięku. Jest ono wyznaczane jako algebraiczna różnica między progiem słyszenia osoby badanej bez i z ochronnikiem słuchu, wyrażana w decybelach. Sygnał pomiarowy do subiektywnego zbadanie tłumienia ochronników to szum różowy filtrowany pasmami 1/3 oktawy z częstotliwością środkową od 125 Hz do 8000 Hz [1].

Zrozumienie budowy oraz podstawowych funkcji narządu słuchu pozwala lepiej pojąć sposób, w jaki odbierana jest fala akustyczna. W niniejszej pracy kluczową rolę odgrywa zarówno głośność dźwięku, jak i sposób, w jaki jest ona percypowana. Głośność stanowi prostą cechę wrażeniową, co oznacza, że można ją wyrazić za pomocą wielkości fizycznej, jaką jest ciśnienie akustyczne. Ponadto cecha ta umożliwia klasyfikację dźwięków od najcichszych po najgłośniejsze. Najniższą wartością w zakresie głośności, jaką jest w stanie usłyszeć człowiek, jest tzw. próg słyszalności, określany również jako próg detekcji sygnału [3]. Na górnej granicy pola słuchowego znajduje się próg dyskomfortu i bólu. Próg dyskomfortu to poziom dźwięku osiągający ok. 100 - 110 dB SPL, a próg bólu wynosi powyżej ok. 120 dB SPL [7]. Granica podziału między hałasem dokuczliwym, a tym, który nie powoduje dyskomfortu jest niewyraźna. Na sposób jego odbioru wpływają przede wszystkim: poziom, częstotliwość pojawiania się, czas trwania czy charakterystyka widmowa [6].

Ze względu na dużą różnorodność modeli wkładek przeciwhałasowych nie opracowano jednej, unormowanej metody badania ich tłumienia, która pozwalałaby na obiektywne określenie tego parametru. Poszukiwania takiej metody podjęto w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy, gdzie opracowano specjalny tester akustyczny stanowiący jej podstawę. Wykorzystując ten tester, przeprowadzono badania na kilkunastu modelach wkładek, co wykazało, że metoda ta może być przydatna do obiektywnej oceny właściwości akustycznych ochronników słuchu [4]. Nie posiadając jednak specjalnego testera, skupiono się na poszukiwaniu innej obiektywnej metody zbadania tłumienia dźwięku przez wkładki. Dodatkowo przeprowadzono badanie subiektywne, które pozwoliło na porównanie otrzymanych wyników przy pomiarach obiektywnych. Ochronniki użyte do badań w niniejszym artykule to: Loop Experience 2 Plus, Bollsen Life+ oraz Alpine PartyPug.

2 Metoda obiektywna

Z racji braku jednej unormowanej obiektywnej metody pomiaru tłumienia dźwięku przez ochronniki słuchu, a dokładniej przez wkładki przeciwhałasowe, w niniejszej pracy zaproponowano metodę z użyciem fantomu sztucznej głowy. Układ pomiarowy zaprezentowano z rys. 1. Do badań użyto dwóch sygnałów pomiarowych - sygnał sinusoidalny o częstotliwościach 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz oraz szum różowy filtrowany pasmami o szerokości $1/3$ oktawy z częstotliwością środkową równą częstotliwości sygnału sinusoidalnego. Do generowania pobudzenia sinusoidalnego użyto generatora Signalgenerator RFT 03005. Szum różowy generowano wykorzystując Rauch-generator RFT 03004, a następnie filtrowano go stosując korektor Bruel & Kjaer 1614. Sygnały pomiarowe przekazywane były na wejścia 1-3 miksera audio Soundcraft EPM 8. Z miksera dany sygnał pomiarowy trafiał na słuchawki iSK HD9999, które nakładane były na fantom sztucznej głowy. Jest to odlew głowy ze sztywnego materiału, zaś małżowina uszna została wykonana z tworzywa sztucznego zapewniającego elastyczność. Wykonany został również model przewodu słuchowego, do którego aplikowano badany ochronnik. Wewnątrz modelu kanału ucha zewnętrznego znajduje się mikrofon. Dzięki podłączeniu woltomierza napięcia skutecznego VLM 698 ustawionym na wskazywanie wartości RMS, można było odczytywać poziom napięcia sygnału.



Rysunek 1: Układ pomiarowy

Istotnym aspektem było odpowiednie dopasowanie wkładki przeciwhałasowej do modelu kanału słuchowego. Jest to jeden z kluczowych czynników decydujących o skuteczności działania ochronnika [9]. Z racji tego, że każdy badany model ochronnika miał inną budowę, przy każdym pomiarze należało z dużą starannością wprowadzać wkładkę do kanału. Ze względu na swoją elastyczną konstrukcję najłatwiej aplikowało się ochronnik Bollsen Life+, z kolei najtrudniej model Loop Experience 2 Plus, co również mogło wynikać z konstrukcji i kształtu. Wkładka marki Loop najbardziej przypomina wyglądem słuchawki dokanałowe, a ten rodzaj budowy ochronnika utrudnia odpowiednie dopasowanie ochronnika do specyficznej anatomii przewodu słuchowego. W przypadku sygnału pomiarowego jakim był szum różowy, pomiarów dokonano dwukrotnie, zaś dla sygnału sinusoidalnego pomiary wykonano jednokrotnie. Pomiar polegał na podaniu sygnału na słuchawki, które obejmowały model ucha, a następnie czytano wartości wskazywane przez miernik. Czynności te dokonano bez ochronnika i z ochronnikiem zaaplikowanym do kanału słuchowego. Tłumienie wyliczano jako algebraiczną różnicę wartości zmierzonej bez wkładki i wartości zmierzonej z wkładką, wyznaczaną w decybelach [9].

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów zmierzone bez zaaplikowanego ochronnika.

Tabela 1: Tłumienie zmierzone bez wkładki przeciwhałasowej

Częstotliwość [Hz]		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tłumienie [dB]	Pomiar nr 1	10	9	15	17	11	13	6
	Pomiar nr 2	13	10	17	11	13	16	6

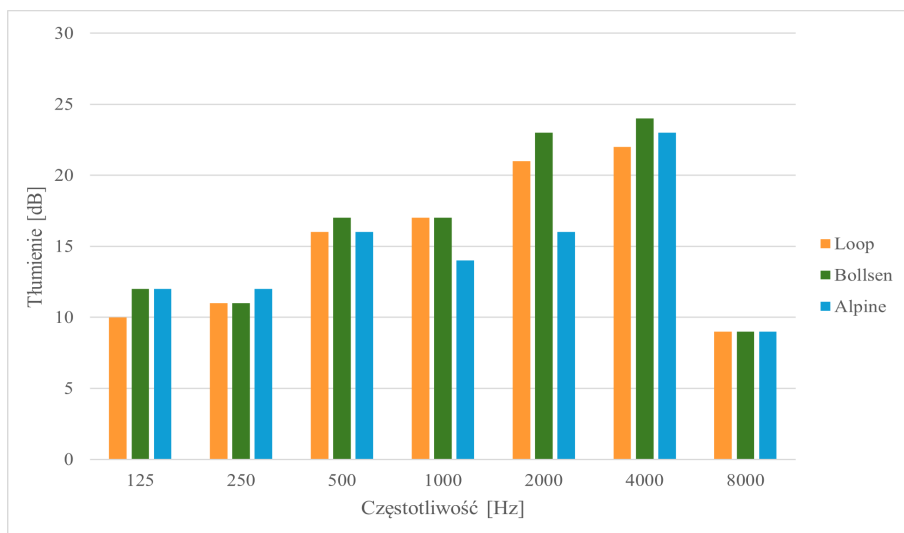
Pierwszym użytym sygnałem pomiarowym był szum różowy filtrowany pasmami ter-

cjowymi.

Tabela 2: Wyniki pomiarów dla szumu różowego filtrowanego pasmami tercjowymi

Częstotliwość [Hz]		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tłumienie [dB]	Loop	10	11	16	17	21	22	9
		13	12	18	21	23	25	9
	Bollsen Life+	12	11	17	17	23	24	9
		15	12	19	21	25	27	9
	Alpine	12	12	16	14	16	23	9
		15	13	18	18	18	26	9

Jak można zauważyć, różnice między pierwszym a drugim pomiarem nie przekraczały 3 dB, z wyjątkiem częstotliwości środkowej 1 kHz, gdzie dla każdego modelu wkładki wynosiły 4 dB. W drugim pomiarze zaobserwowano również większe tłumienie, co może wynikać z lepszego dopasowania ochronnika do modelu kanału słuchowego, spowodowanego jego wstępnym ukształtowaniem podczas pierwszego pomiaru. Ponadto, analizując wykres tłumienia w zależności od częstotliwości (rysunek 2), można zauważyć, że połączenie uzyskanych wartości pomiarowych tworzyłoby kształt zbliżony do odwrotności krzywej izofonicznej.



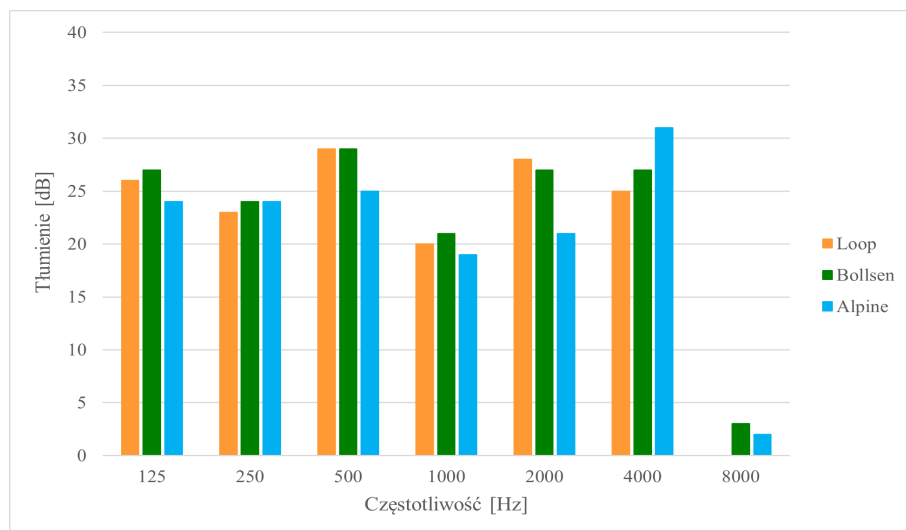
Rysunek 2: Wartości tłumienia przy pierwszym pomiarze dla szumu różowego

Drugim wykorzystanym sygnałem pomiarowym był sygnał sinusoidalny o częstotliwościach takich samych, co środkowe pasm szumu. Wyniki pomiarów tłumienia przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3: Wyniki pomiarów dla sygnału sinusoidalnego

Częstotliwość [Hz]		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tłumienie [dB]	Loop	26	23	29	20	28	25	0
	Bollsen Life+	27	24	29	21	27	27	3
	Alpine	24	24	25	19	21	31	2

Tłumienie zmierzone przy użyciu sygnału sinusoidalnego dało wyższe wartości w porównaniu do pobudzenia szumowego. Wartości te wskazują również na skuteczne tłumienie o szerokim zakresie częstotliwości. Jedynie dla częstotliwości 8000 Hz uzyskano wynik rozbieżny z oczekiwanym. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wyników dla trzech modeli.

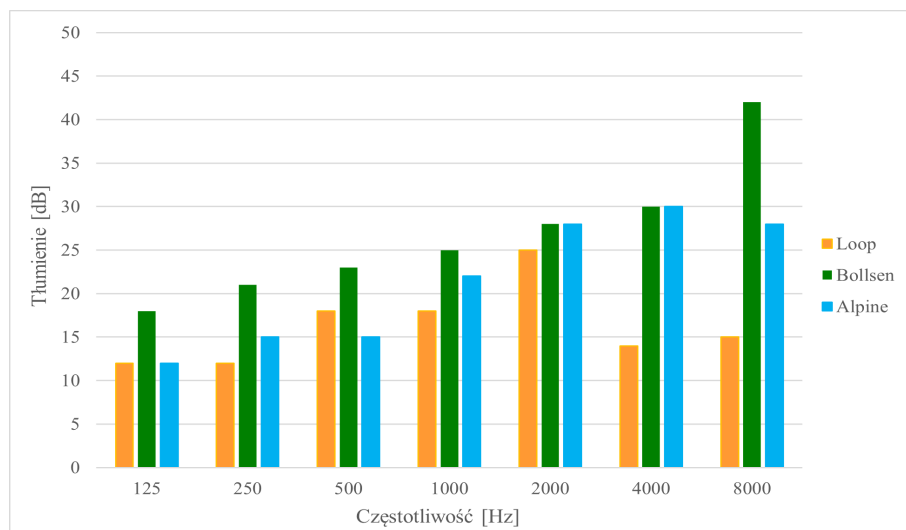


Rysunek 3: Wartości tłumienia przy pomiarze dla sygnału sinusoidalnego

3 Metoda subiektywna

Pomiary metodą subiektywną zakładały przeprowadzenie badania Pure Tone Audiometry, czyli badania audiometrycznego z wykorzystaniem ochronników. Zostało ono przeprowadzone w kabinie odsłuchowej należącej do Katedry Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów na Politechnice Wrocławskiej. Komora ta zapewnia skuteczne tłumienie hałasu zewnętrznego, przy czym poziom tła mieścił się w przedziale 20–23 dBA. Do pomiarów wykorzystano audiometr Maico MA52. Każda z badanych osób została odpowiednio przygotowana – najpierw otrzymała szczegółowe objaśnienia dotyczące przebiegu eksperymentu, a następnie przeszła próbny pomiar. Ze względu na to, że ubytki słuchu u badanych nie przekraczały 15 dB HL, pozwoliło to zakwalifikować ich jako osoby otologicznie zdrowe, zatem wszyscy uczestnicy zostali dopuszczeni do przeprowadzenia badań audiometrycznych z wykorzystaniem wkładek przeciwhałasowych. Badanie wykonywano na jednym uchu każdej osoby, rozpoczynając od pomiaru bez ochronnika, a później wprowadzając do kanału słuchowego dany model wkładki. Częstotliwości pomiarowe były zgodne z normą dotyczącą subiektywnego badania tłumienia ochronników słuchu [1], a jako sygnał testowy zastosowano sygnał sinusoidalny.

Tłumienie wkładki obliczono w taki sam sposób, jak dla pomiarów obiektywnych, tzn. jako różnicę między wartościami progowymi zmierzonymi dla słuchacza z wkładką i bez wkładki. Uśrednione dla wszystkich słuchaczy wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4.

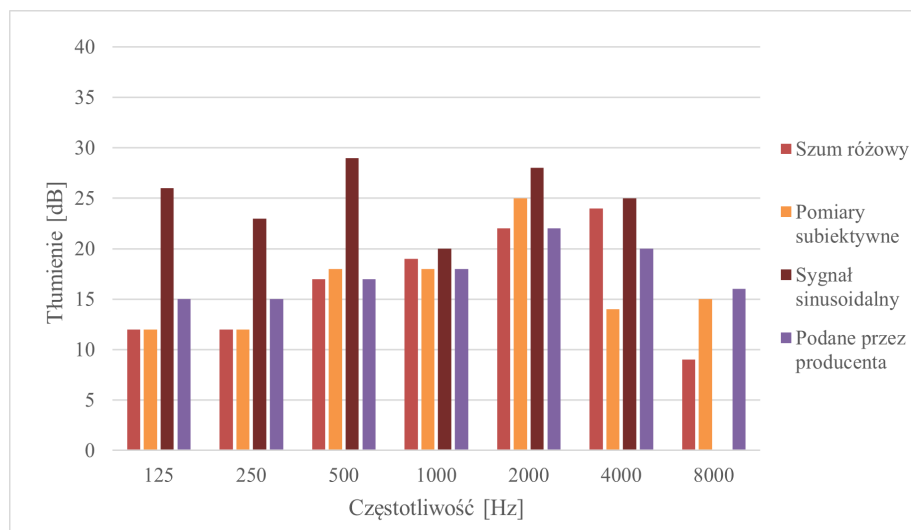


Rysunek 4: Wartości tłumienia przy pierwszym pomiarze dla szumu różowego

Różnice w wartościach progowych wśród wszystkich badanych sięgały 15 dB, co mogło wynikać zarówno z nieprecyzyjnego zaaplikowania wkładki, jak i indywidualnych różnic w progach słyszenia. Niezaprzeczalnym faktem jest jednak to, że u każdego uczestnika badań zastosowanie ochronnika słuchu w przewodzie słuchowym skutkowało podwyższeniem progu słyszenia. Wniosek ten potwierdza skuteczność wkładek przeciwhałasowych w tłumieniu docierających do ucha bodźców dźwiękowych, choć jednocześnie podkreśla konieczność ich właściwego dopasowania, aby osiągnąć maksymalną efektywność tłumienia.

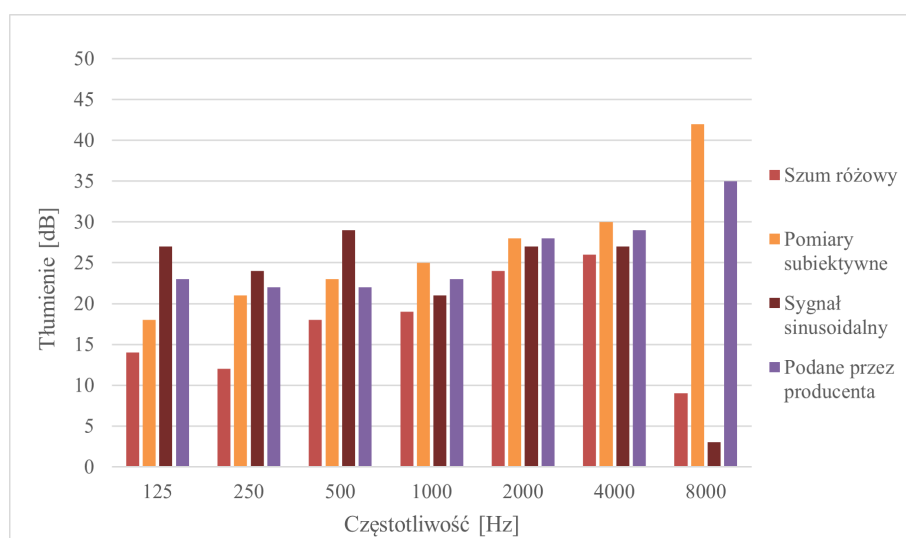
4 Dyskusja wyników

Podsumowując wszystkie wykorzystane do badań metody, zgromadzono wyniki, a następnie przedstawiono je na wykresach umożliwiając ich porównanie.

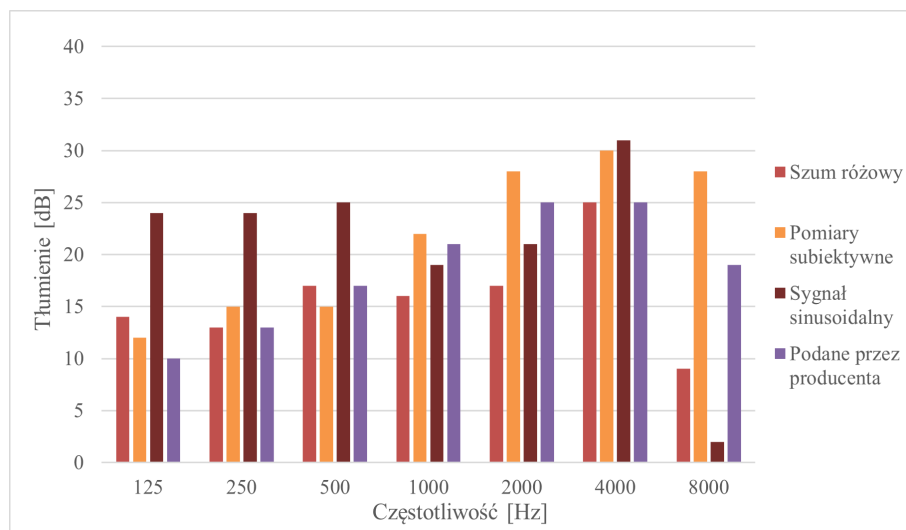


Rysunek 5: Porównanie wyników - Loop Experience 2 Plus

Otrzymane wyniki wskazują, że w zakresie częstotliwości 125–4000 Hz najbardziej zbliżone do wartości deklarowanych przez producenta wyniki tłumienia uzyskano w badaniach subiektywnych – różnice dla wszystkich wkładek nie przekraczały 7 dB. Nieco większe rozbieżności, sięgające 12 dB, zaobserwowano w przypadku pomiarów z wykorzystaniem sygnału szumowego. Natomiast największą zmienność wyników, zwłaszcza dla częstotliwości do 500 Hz, wykazały pomiary przeprowadzone przy użyciu sygnału sinusoidalnego. Na tej podstawie można stwierdzić, że stosowanie sygnału sinusoidalnego w badaniach z wykorzystaniem analizowanego fantomu nie jest rekomendowane, ponieważ może prowadzić do zwiększonej niestabilności wyników.



Rysunek 6: Porównanie wyników - Bollsen Life+



Rysunek 7: Porównanie wyników - Alpine PartyPlug

Podsumowując, zaproponowana metoda obiektywnej oceny tłumienia wkładek, oparta na pomiarach przeprowadzonych na modelu kanału słuchowego ucha zewnętrznego przy użyciu pobudzenia szumowego, wykazała zgodność wyników dla niektórych częstotliwości poniżej 8 kHz. Możliwe przyczyny tych rozbieżności można upatrywać w pewnych nieidealnym modelu – zarówno zjawiska falowe, jak i występujące przesłuchy wynikające z niedostatecznej izolacyjności fantomu, których wartość zmieniała się w zakresie od -30 dB do -5 dB w zależności od częstotliwości, mogły wpływać na uzyskane wyniki tłumienia. Dodatkowym czynnikiem mającym wpływ na pomiary było dopasowanie wkładki do modelu kanału słuchowego, które powinno być jak najbardziej precyzyjne, jednak w praktyce jest to bardzo trudne do osiągnięcia. Wyniki te wskazują, że choć metoda może być przydatna w określonych warunkach, jej skuteczność zależy od precyzji odwzorowania rzeczywistego przewodu słuchowego oraz dokładności aplikacji wkładek.

5 Podsumowanie

Wyniki tłumienia uzyskane za pomocą audiometrii tonalnej wykazują największą zgodność z danymi podawanymi przez producentów. Jednak metoda ta nie jest optymalnym rozwiązaniem do zastosowań przemysłowych mających na celu weryfikację skuteczności tłumienia wkładek, głównie ze względu na jej wysokie koszty oraz czasochłonność. Alternatywnym podejściem może być wykorzystanie metody pomiarów z zastosowaniem pobudzenia sygnałem szumowym, która pozwala na uzyskanie porównywalnych wartości tłumienia. Ewentualne rozbieżności w wynikach tej metody mogą wynikać z niedokładnego

dopasowania wkładki przeciwhałasowej do kanału słuchowego – czynnika kluczowego dla efektywności ochronnika [9]. W związku z tym dalsze badania powinny koncentrować się na metodach poprawiających precyzję aplikacji wkładek, co mogłoby znacząco zwiększyć powtarzalność i wiarygodność uzyskanych wyników, jednocześnie minimalizując wpływ czynników losowych na pomiary.

Ciekawą perspektywą wydaje się adaptacja teorii tłumienności wtrąceniowej, skutecznie wykorzystywanej w układach teletransmisyjnych [8]. Zastosowanie tego podejścia, opierającego się na zmianie impedancji ośrodka, mogłoby usprawnić proces kontroli parametrów oraz ułatwić projektowanie nowych wkładek przeciwhałasowych.

W przypadku częstotliwości 8000 Hz uzyskane wartości tłumienia znacząco odbiegały zarówno od oczekiwanych, jak i deklarowanych przez producentów. Przyczyna tego zjawiska wymaga jednak dokładniejszych badań i szczegółowych analiz, które autorka planuje przeprowadzić w przyszłości.

Literatura

- [1] PN-EN ISO 4869-1:2018-12. *Akustyka. Ochronniki słuchu. Część 1: Metoda subiektywna pomiaru tłumienia dźwięku.*
- [2] M. Kin A. Dobrucki. Research on the perception of sound color by people with presbycusis. *XVIII Międzynarodowe Sympozjum Inżynierii i Reżyserii Dźwięku ISSET*, 2021.
- [3] K. Dajos-Krawczyńska. Dyskryminacja słuchowa w zakresie częstotliwości, intensywności i czasu trwania dźwięku –podstawy teoretyczne – przegląd literatury. *Nowa Audiofonologia*, 2016: 30-38.
- [4] R. Młyński E. Kotarbińska, E.Kozłowski. Objective tests and the assessment of the acoustic properties of ear-plugs. *Archives of Acoustics*, 2006.
- [5] E. Hojan. *Protetyka słuchu*. Wydawnictwo Naukowe UAM, 2017.
- [6] A. Wnuk I. Leśnikowska-Matusiak. Wpływ hałasu komunikacyjnego na stan środowiska akustycznego człowieka. *Transport samochodowy*, 3/2014.
- [7] U. Jorasz. *Wykłady z psychoakustyki*. Wydawnictwo Naukowe UAM, 1998.

- [8] W. Kazimierczak. *Miernictwo teletechniczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1971.
- [9] E. Kotarbińska. Indywidualne ochrony słuchu - skuteczność ich działania w środowisku pracy. *Zeszyty naukowe wyższej szkoły zarządzania ochroną pracy w Katowicach*, Nr 1(5)/2009, s. 26-38.

Paweł Kabała

Ocena wierności nagrań sygnałów instrumentów muzycznych

The accuracy of auralization of recordings of musical instrument

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

01169297@pw.edu.pl

Streszczenie

W niniejszej pracy dokonano analizy wierności procesu auralizacji nagrań sygnałów instrumentów muzycznych. Proces auralizacji polega na splocie nagrań bezechowych z odpowiedzią impulsową danego pomieszczenia, co umożliwia symulację odsłuchu dźwięku w wybranej przestrzeni. Do rejestracji nagrań referencyjnych wykorzystano manekin akustyczny. Zbadano różne przestrzenie pomiarowe, takie jak komora bezechowa i studio nagrań. Opracowano oprogramowanie w języku Python z graficznym interfejsem użytkownika (GUI), umożliwiające przeprowadzanie procesu auralizacji oraz analizę wyników za pomocą współczynnika korelacji. Przeprowadzono testy na różnych instrumentach muzycznych i oceniono skuteczność odwzorowania przestrzenności dźwięku.

1 Wstęp

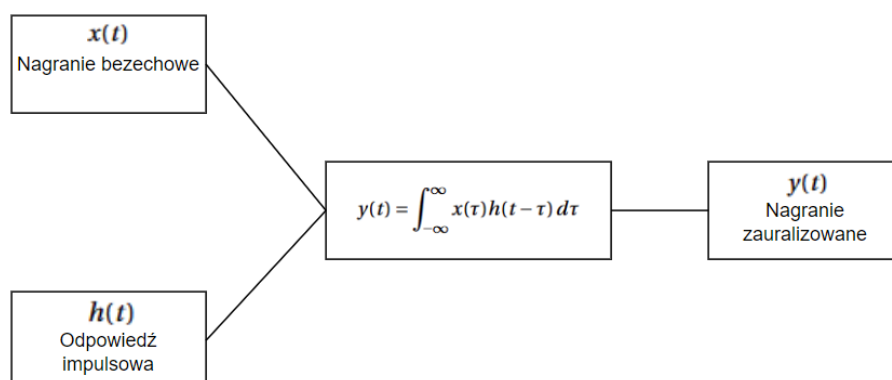
Auralizacja to proces symulacji wrażeń słuchowych, pozwalający na realistyczne odwzorowanie dźwięku w wirtualnym środowisku akustycznym. Technika ta znajduje zastosowanie w nagraniach muzycznych, projektowaniu akustyki pomieszczeń oraz systemach rzeczywistości wirtualnej. Kluczowym zagadnieniem w auralizacji jest wierność odwzorowania cech przestrzennych dźwięku. Celem niniejszego badania jest ocena skuteczności procesu auralizacji nagrań instrumentów muzycznych przy wykorzystaniu pomiarów akustycznych w różnych przestrzeniach.

2 Przebieg badań

2.1 Definicja procesu auralizacji

W niniejszej pracy proces auralizacji definiowany jest jako zastosowanie operacji splotu między nagraniem bezechowym, czyli zarejestrowanym w warunkach całkowitego wyeliminowania odbić dźwięku, a odpowiedzią impulsową pomieszczenia, która opisuje jego parametry akustyczne i właściwości przestrzenne. Odpowiedzi impulsowe mogą być symulowane numerycznie lub rejestrowane w rzeczywistych warunkach. W ramach badań przyjęto podejście polegające na wykorzystaniu rzeczywistych odpowiedzi impulsowych, co pozwala na uzyskanie realistycznych efektów dźwiękowych [1].

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau \quad (2-1)$$



Rysunek 1: Schemat blokowy procesu auralizacji

$x(t)$ = Sygnał wejściowy (nagranie bezechowe)

$h(t)$ = Odpowiedź impulsowa (akustyka pomieszczenia)

$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau$ (nagranie zauralizowane)

2.2 Wybór instrumentów muzycznych

Do testów wybrano instrumenty reprezentujące różne kategorie pod względem sposobu generowania dźwięku oraz jego właściwości akustycznych:

- **Instrumenty strunowe:** gitara klasyczna, gitara elektryczna, gitara basowa.
- **Instrumenty smyczkowe:** kontrabas (grany pizzicato oraz smyczkiem), wiolonczela.
- **Instrumenty dęte:** saksofon, flet poprzeczny, akordeon.
- **Instrumenty perkusyjne:** dzwonki diatoniczne.

Dobór instrumentów uwzględniał ich różnorodność pod kątem zakresu częstotliwościowego oraz sposobu emisji dźwięku, co umożliwia kompleksową ocenę wierności procesu auralizacji.

2.3 Miejsca pomiarów

W celu dokładnego przetestowania wierności auralizacji instrumentów muzycznych wybrano cztery różnorodne pomieszczenia o zróżnicowanych właściwościach akustycznych. Każda przestrzeń została wybrana w sposób celowy, aby zbadać wpływ charakterystyki akustycznej na wyniki procesu auralizacji.

2.3.1 Komora bezechowa

Do nagrań bezechowych wykorzystano komorę bezechową, która jest środowiskiem pozbawionym odbić akustycznych. Komora ta pozwala na rejestrację dźwięków w warunkach najbardziej zbliżonych do pola fali swobodnej, czyli pozbawionego odbić. Dzięki temu możliwe było uzyskanie bazowego nagrania, pozbawionego wpływu otoczenia akustycznego, które następnie mogło zostać wykorzystane w procesie auralizacji [2].

2.3.2 Studio nagrań

Studio nagrań zostało wybrane jako reprezentatywne środowisko akustyczne, gdzie warunki odsłuchowe są zoptymalizowane pod kątem produkcji i analizy, a także odsłuchu dźwięku. Dzięki swoim właściwościom akustycznym, studio nagrań stanowi punkt odniesienia dla oceny skuteczności auralizacji w kontekście realistycznego odwzorowania brzmienia.

2.3.3 Sala 123

Sala 123 to pomieszczenie charakteryzujące się mniej korzystnymi właściwościami akustycznymi w porównaniu do studia nagrań. Wybór tej przestrzeni umożliwia zbadanie skuteczności auralizacji w trudniejszych warunkach odsłuchowych, które mogą występować w typowych salach wykładowych czy pomieszczeniach konferencyjnych.

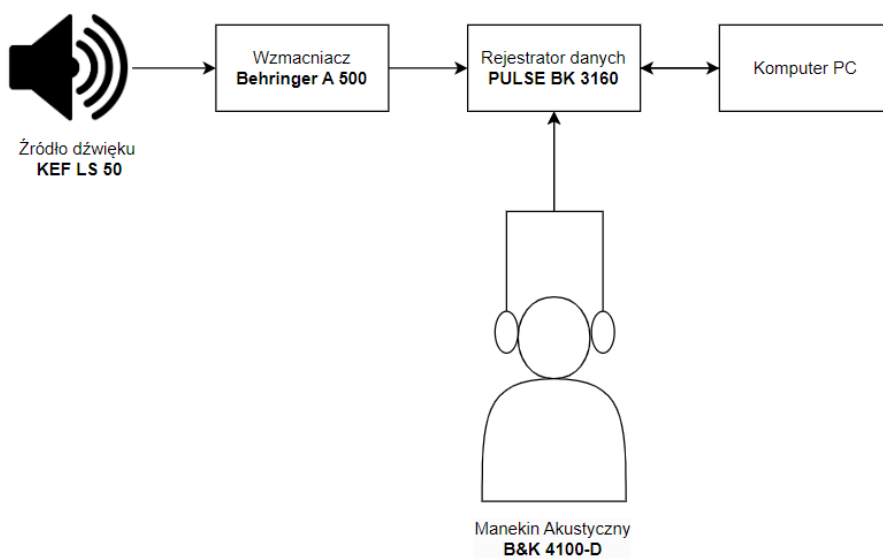
2.3.4 Korytarz Zakładu Elektroakustyki

Korytarz Zakładu Elektroakustyki jest przestrzenią o również niekorzystnych właściwościach akustycznych spośród wybranych lokalizacji. Długie czasy pogłosu, odbicia i brak optymalizacji akustycznej sprawiają, że jest to wymagające środowisko testowe.

2.4 Pomiary

W celu przeprowadzenia dokładnych analiz procesu auralizacji wykonano trzy rodzaje pomiarów: nagrania bezechowe, nagrania referencyjne oraz rejestrację odpowiedzi impulsowych. Poniżej opisano szczegółowy przebieg każdego z etapów.

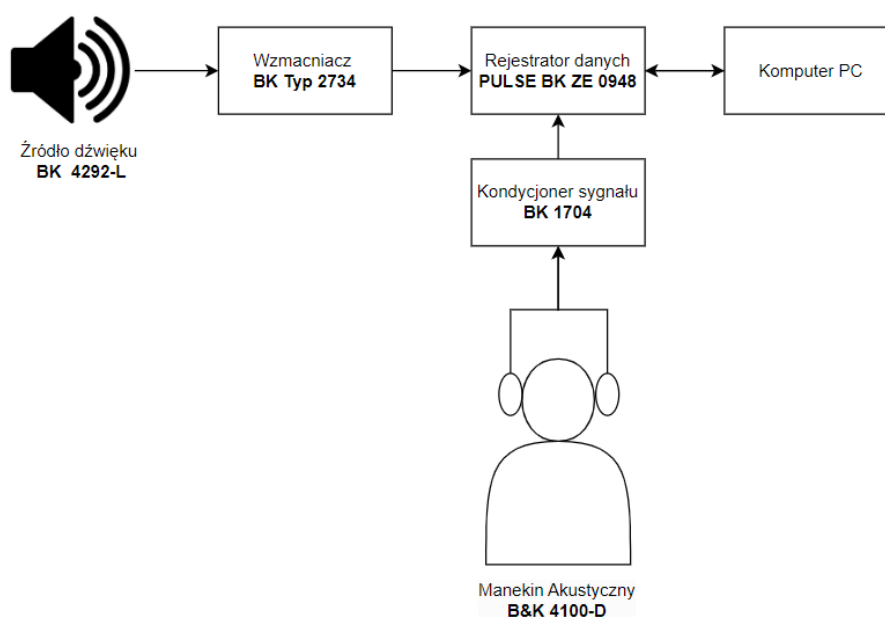
2.4.1 Układ do rejestracji nagrań referencyjnych z użyciem manekina akustycznego



Rysunek 2: Schemat rejestracji nagrań referencyjnych

Schemat przedstawia układ do rejestracji nagrań referencyjnych, w którym źródło dźwięku (głośnik KEF LS 50) jest wzmocnione przez wzmacniacz Behringer A 500, a następnie sygnał jest rejestrowany za pomocą rejestratora danych PULSE BK 3160. Rejestrator współpracuje z manekinem akustycznym B&K 4100-D, a dane są przesyłane do komputera PC w celu analizy.

2.4.2 Układ do rejestracji odpowiedzi impulsowych pomieszczeń



Rysunek 3: Schemat rejestracji odpowiedzi impulsowych

Schemat przedstawia układ do rejestracji odpowiedzi impulsowych pomieszczeń. Źródło dźwięku (BK 4292-L) jest wzmocniane za pomocą wzmacniacza BK Typ 2734, a sygnał rejestrowany przez rejestrator danych PULSE BK ZE 0948. Kondycjoner sygnału BK 1704 przesyła dane z manekina akustycznego B&K 4100-D do rejestratora, a następnie do komputera PC w celu analizy.

2.4.3 Nagrania w warunkach bezpogłosowych

Artysta, grający na wybranym instrumencie, był umieszczany w centralnej części komory. Mikrofon został ustawiony w pobliżu źródła dźwięku w sposób pozwalający na rejestrację dźwięku bez zakłóceń z otoczenia. Mikrofon był połączony z rejestratorem cyfrowym, a zapis audio odbywał się przy użyciu oprogramowania Reaper. Dzięki takim warunkom udało się uzyskać czyste nagrania, pozbawione wpływu akustyki pomieszczenia, co było kluczowe dla dalszego procesu auralizacji. Dźwięk na który się zdecydowano to "Sto lat" oraz "Gama".

2.4.4 Nagrania referencyjne

Nagrania referencyjne wykonano w pomieszczeniach opisanych wcześniej. W tym celu nagrania z komory bezechowej odtwarzano za pomocą głośnika o wysokiej jakości akustycznej KEF LS 50. Dźwięk odtwarzany w pomieszczeniu był rejestrowany za pomocą manekina akustycznego, co pozwalało na uchwycenie realistycznej percepcji przestrzennej dźwięku.

Podczas nagrań referencyjnych manekin akustyczny był ustawiany w trzech różnych pozycjach w pomieszczeniu:

- na wprost od źródła dźwięku,
- prawym lub lewym uchem skierowanym na źródło dźwięku,
- w większej odległości od źródła dźwięku

Zmienność pozycji miała na celu zwiększenie rzetelności testu i uchwycenie zróżnicowanych warunków akustycznych.

Do rejestracji nagrań wykorzystano oprogramowanie *Pulse Labshop*, które zapewniało precyzyjny zapis dźwięku z manekina akustycznego.

2.4.5 Rejestracja odpowiedzi impulsowej

Aby określić charakterystykę akustyczną każdego z pomieszczeń, zarejestrowano odpowiedzi impulsowe. Procedura była analogiczna do nagrań referencyjnych. Sygnał emitowany przez wszechkierunkowe źródło dźwięku został zarejestrowany za pomocą manekina akustycznego przy użyciu oprogramowania *Dirac* z wykorzystaniem metody Swept-sine,

która jest popularna w pomiarach akustycznych. Polega ona na emisji sygnału sinusoidalnego o zmieniającej się częstotliwości (od niskich do wysokich), a następnie rejestrowaniu odpowiedzi pomieszczenia. Po nagraniu, sygnał jest przetwarzany z użyciem odwrotnego filtra, aby uzyskać odpowiedź impulsową pomieszczenia [3].

Manekin akustyczny był ustawiany w tych samych trzech pozycjach, co podczas nagrań referencyjnych, aby zapewnić spójność pomiarów. Uzyskane odpowiedzi impulsowe stanowiły kluczowy element procesu auralizacji, ponieważ pozwalały na odtworzenie właściwości akustycznych każdego z badanych pomieszczeń.

2.5 Program do Auralizacji

W celu przeprowadzenia auralizacji został opracowany program, który umożliwia wczytywanie dwóch plików audio: nagrania bezechowego oraz odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, przy czym pliki muszą być zapisane w formacie `.wav`. W przypadku różnicy w częstotliwościach próbkowania program zmienia częstotliwość próbkowania odpowiedzi impulsowej, aby zapewnić zgodność z nagraniem bezechowym, aby dopasować się do nagrania bezechowego. Proces splotu sygnałów różni się w zależności od formatu odpowiedzi impulsowej – dla wersji monofonicznej wykonywany jest spłot jednokanałowy, generując wyjściowe nagranie monofonicznej, natomiast dla wersji stereo spłot przeprowadzany jest osobno dla każdego kanału, co pozwala na zachowanie przestrzenności dźwięku. Do wykonania tych obliczeń zastosowano funkcję `fftconvolve` z biblioteki `scipy.signal`, co zapewnia szybkie i dokładne obliczenia w dziedzinie częstotliwości. Po zakończeniu splotu sygnał wynikowy jest normalizowany do zakresu $[-1, 1]$, co zapobiega przesterowaniom dźwięku. Na koniec użytkownik może zapisać zaauralizowane nagranie w wybranym przez siebie miejscu na dysku.

2.6 Ocena wierności

Wierność auralizacji odnosi się do stopnia, w jakim proces ten potrafi odwzorować rzeczywiste doświadczenie akustyczne w symulowanym środowisku. W kontekście badań akustycznych oraz analizy jakości dźwięku kluczowe jest, aby auralizacja dokładnie odzwierciedlała charakterystykę akustyczną rzeczywistych przestrzeni. Ocena wierności w niniejszej pracy polega na weryfikacji, czy proces auralizacji poprawnie odwzorowuje właściwości akustyczne nagrań poszczególnych instrumentów, w tym ich przestrzenność oraz

zróźnicowanie widmowe. W celu obiektywnego określenia podobieństwa między nagraniami zastosowano współczynnik korelacji dany wzorem **2-2**:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^*(t - \tau) dt \quad (2-2)$$

2.6.1 Obliczanie korelacji

Do przeprowadzania analizy opracowano kolejne autorskie narzędzie w języku **Python** w wersji **3.11**. Narzędzie to pozwala na porównanie nagrań referencyjnych z nagraniami zauralizowanymi, generując wyniki w postaci procentowych wartości korelacji w dziedzinie częstotliwości oraz wizualizując różnice między sygnałami w czasie.

W wyniku wykresy widm czasowych oraz wyniki korelacji dla każdej z czterech następujących konfiguracji:

- **LL**: lewy kanał referencyjny z lewym zauralizowanym.
- **PP**: prawy kanał referencyjny z prawym zauralizowanym.
- **LP**: lewy kanał referencyjny z prawym zauralizowanym.
- **PL**: prawy kanał referencyjny z lewym zauralizowanym.

3 Wyniki

3.1 Wyniki średnich korelacji

Tabela 1: Średnie i najwyższe korelacje dla instrumentów muzycznych

Instrument	Średnia Korelacja	Najwyższa Korelacja	Kanały	Miejsce Osiągnięcia	Pozycja
Kontrabas Palcami	0,88	0,97	LL	Korytarz ZEA	Prawe ucho
Gitara Klasyczna	0,87	0,98	LL	Korytarz ZEA	Na wprost
Gitara Basowa	0,86	0,93	LL	Studio Nagrań	Na wprost
Kontrabas Smyczkiem	0,85	0,95	LL	Studio Nagrań	Lewe ucho
Wiolonczela	0,84	0,95	LL	Korytarz ZEA	Na wprost
Flet	0,76	0,85	PL	Sala 123	Na wprost
Dzwonki diatoniczne	0,74	0,87	PL	Studio Nagrań	Lewe ucho
Gitara Elektryczna	0,73	0,82	PP	Sala 123	Prawe ucho
Saksofon	0,71	0,81	PP	Studio Nagrań	Lewe ucho
Akordeon	0,68	0,79	PP	Studio Nagrań	Prawe ucho

Analiza średnich wyników korelacji pokazuje, że najlepsze odwzorowanie w procesie auralizacji osiągnięto dla kontrabas granego palcami (0,88) oraz gitary klasycznej (0,87). Można również zauważyć zdecydowaną przewagę w skuteczności auralizacji dla instrumentów strunowych oraz smyczkowych, które lepiej przechodzą taki proces. Z kolei najniższe średnie korelacje uzyskano dla akordeonu (0,68) oraz saksofonu (0,71), co może wynikać z bardziej skomplikowanego charakteru akustycznego ich brzmienia oraz mniejszej wierności odwzorowania w trudniejszych akustycznie pomieszczeniach. Ponadto najwyższe wartości korelacji dla poszczególnych instrumentów odnotowano głównie w Korytarzu ZEA oraz Studio Nagrań. Szczególnie wyróżnia się gitara klasyczna z korelacją 0,98 oraz kontrabas grany palcami z wynikiem 0,97. Analiza ta podkreśla znaczenie zarówno właściwego doboru przestrzeni nagraniowej, jak i akustycznych właściwości instrumentów w procesie auralizacji. Wnioski te mogą stanowić podstawę do dalszych badań nad analizą charakterystyki instrumentu w skuteczności przechodzenia procesu auralizacji.

3.2 Auralizacja w zależności od przestrzeni

Tabela 2: Średnie wyniki korelacji w poszczególnych pomieszczeniach

Instrument	Sala 123	Korytarz ZEA	Studio Nagrań
Akordeon	0,66	0,62	0,75
Dzwonki diatoniczne	0,69	0,77	0,77
Flet	0,77	0,73	0,79
Gitara Basowa	0,75	0,91	0,91
Gitara Elektryczna	0,73	0,70	0,78
Gitara Klasyczna	0,79	0,92	0,88
Kontrabas Palcami	0,78	0,95	0,92
Kontrabas Smyczkiem	0,80	0,84	0,93
Saksofon	0,72	0,67	0,75
Wiolonczela	0,73	0,92	0,88
Średnia	0,74	0,80	0,83

Najwyższą średnią korelację odnotowano w pomieszczeniu najmniej pogłosowym, czyli Studio Nagrań - 0,83, z kolei dla mniej sprzyjających warunków odnotowano następujące wyniki: Sala 123 - 0,74 oraz Korytarz ZEA - 0,80.

3.3 Wyniki dla instrumentów muzycznych

Wyniki korelacji różniły się w zależności od specyfiki instrumentu:

- **Kontrabas Palcami i Gitara Klasyczna** osiągnęły najwyższe średnie korelacje (**0,88 i 0,87**), co wskazuje na bardzo dobrą adaptację tych instrumentów do procesu auralizacji, niezależnie od pomieszczenia.

- **Akordeon i Saksofon** osiągnęły najniższe średnie korelacje (**0,68 i 0,71**), co może wynikać z ich bogatej barwy i skomplikowanej struktury dźwięku, która jest trudniejsza do odwzorowania.

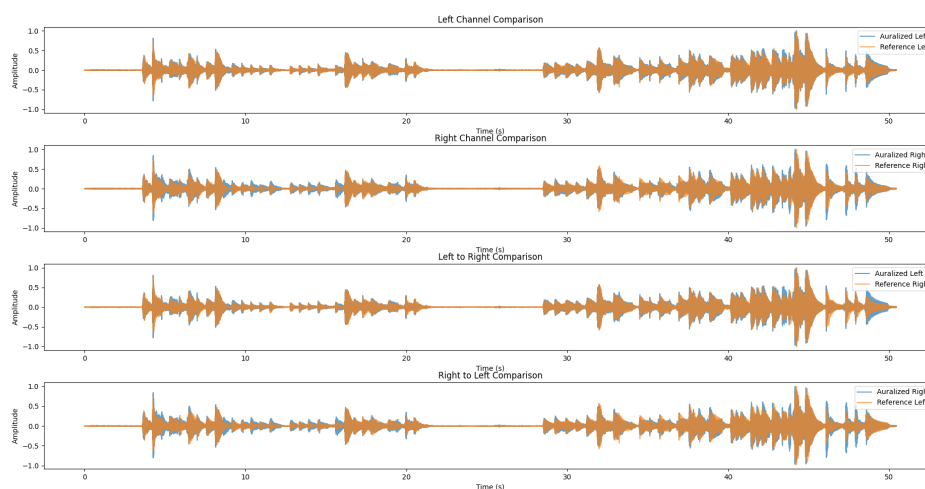
3.4 Ogólna analiza wyników korelacji

Średnia korelacja dla wszystkich instrumentów i pomieszczeń wyniosła około **0,79**, co wskazuje na ogólnie dobrą wierność procesu auralizacji. W szczególności:

- Najwyższe średnie korelacje odnotowano w **Studio Nagrań (0,83)**, które dzięki zoptymalizowanej akustyce zapewniało najbardziej wierne odwzorowanie dźwięku.
- **Korytarz ZEA** uzyskał średnią korelację **0,80**, co jest wynikiem nieco niższym, jednak zaskakująco dobrym, biorąc pod uwagę trudne warunki akustyczne tego pomieszczenia.
- **Sala 123** osiągnęła najniższą średnią korelację (**0,74**), co potwierdza, że jest to pomieszczenie o ograniczonej zdolności do wiernego odwzorowania dźwięków.

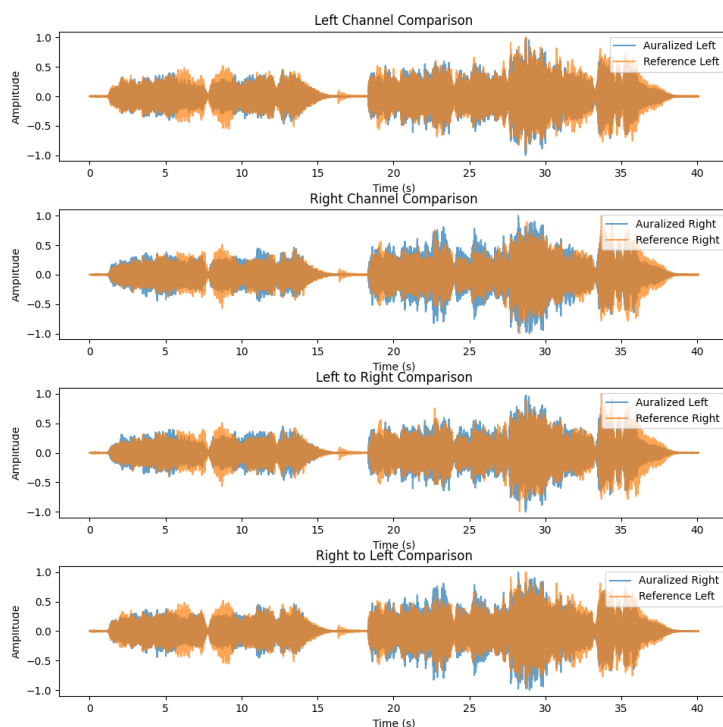
3.5 Najlepsze i najgorsze przypadki

Najwyższą korelację (**0,98**) odnotowano dla **Gitary Klasycznej** w **Korytarzu ZEA**, co sugeruje, że specyfika tego instrumentu idealnie współgra z charakterystyką akustyczną tego pomieszczenia.



Rysunek 4: Gitara klasyczna w pomieszczeniu korytarz ZEA w pozycji skierowanej na wprost

Najniższą korelację (**0,58**) odnotowano dla **Akordeonu** w **Korytarzu ZEA**, co sugeruje, że warunki akustyczne tego pomieszczenia mogą znacząco obniżyć wierność odwzorowania dla instrumentów o bardziej złożonej barwie.



Rysunek 5: Akordeon w pomieszczeniu korytarz w pozycji oddalonej

4 Podsumowanie

Wyniki badań pozwoliły wyciągnąć następujące wnioski:

- Instrumentem najwierniej przechodzącym proces auralizacji jest kontrabas grany palcami, który osiągnął wynik średniej korelacji - **0,88**
- Najgorzej przechodzącym proces auralizacji instrumentem jest Akordeon - **0,68**
- Najlepsze, pojedyncze odwzorowanie zanotowano dla Gitary klasycznej, gdzie uzyskano korelację równą **0,98**
- Przestrzenią oferującą warunki najbardziej sprzyjające jest **Studio Nagrań** gdzie osiągnięto średnią korelację równą **0,83**. Można więc postawić wniosek, iż przestrzenie z krótszymi odpowiedziami impulsowymi sprzyjają procesowi auralizacji. W pomieszczeniach bardziej pogłosowych, otrzymano gorsze wyniki: **Korytarz ZEA** - **0,80** oraz **Sala 123** - **0,74**.

- Instrumenty strunowe najlepiej przechodzą proces auralizacji. Najwyższe 3 wyniki średnich korelacji to: kontrabas palcami, gitara klasyczna oraz gitara basowa.

Instrument	Średnia Korelacja	Najwyższa Korelacja
Kontrabas Palcami	0,88	0,97
Gitara Klasyczna	0,87	0,98
Gitara Basowa	0,86	0,93
Kontrabas Smyczkiem	0,85	0,95
Wiolonczela	0,84	0,95
Flet	0,76	0,85
Dzwonki diatoniczne	0,74	0,87
Gitara Elektryczna	0,73	0,82
Saksofon	0,73	0,81
Akordeon	0,68	0,79

Tabela 3: Średnie i najwyższe korelacje dla instrumentów muzycznych.

Literatura

- [1] M. Vorländer, "Auralization – Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality," Springer, 2007.
- [2] Brüel & Kjær, "Product Data: DIRAC Room Acoustics Software Type 7841," 2007. Available: <https://media.hbkworld.com/m/a4b2f834bcce11dc/original/Product-Data-DIRAC-Room-Acoustics-Software-Type-7841.pdf>.
- [3] ScienceDirect, "Anechoic Chamber," Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anechoic-chamber>.

BADANIE MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA WIELOKOMÓRKOWYCH METAMATERIAŁÓW MEMBRANOWYCH DO ZWIĘKSZANIA IZOLACYJNOŚCI AKUSTYCZNEJ

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

sarakopec@student.agh.edu.pl

Streszczenie

Membranowe struktury rezonansowe, znane również jako metamateriały membranowe, stanowią innowacyjne rozwiązanie w dziedzinie materiałów dźwiękoizolacyjnych, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, przekraczając ograniczenia tradycyjnych rozwiązań. Konwencjonalne materiały izolacyjne działają zgodnie z zasadą prawa masy, izolacyjność akustyczna wzrasta proporcjonalnie do ich masy. Metamateriały membranowe umożliwiają jednak uzyskanie wysokiej izolacyjności akustycznej w niskich pasmach częstotliwości bez konieczności znaczącego zwiększania ciężaru całego układu.

Referat skupia się na opracowaniu i walidacji modelu numerycznego opisującego zachowanie metamateriałów membranowych, a także na analizie metod manipulacji charakterystyką izolacyjności akustycznej. Ponadto, przeanalizowano możliwości integracji pojedynczych membran w wielokomórkowe struktury rezonansowe w celu uzyskania szerszego zakresu częstotliwości działania ustroju.

Weryfikację teoretycznych założeń przeprowadzono na podstawie badań eksperymentalnych, w tym pomiarów akustycznych wykonanych w rurze impedancyjnej zgodnie z normą ASTM E2611-09. Przedstawiono wyniki porównania przewidywań modelu numerycznego z wynikami pomiarów eksperymentalnych. Wyniki te otwierają nowe perspektywy projektowania wysoko wydajnych materiałów dźwiękoizolacyjnych opartych na strukturach rezonansowych..

1. Wprowadzenie

Kontrola hałasu, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii. Problem ten jest szczególnie istotny w sektorze lotniczym, transporcie naziemnym, przemyśle oraz nowoczesnym budownictwie. Hałas niskoczęstotliwościowy charakteryzuje się dużą długością fali, co skutkuje trudnościami w jego efektywnym tłumieniu przy zachowaniu akceptowalnej grubości osłony.

Zgodnie z prawem masy, w pewnym zakresie częstotliwości zazwyczaj istotnym z punktu widzenia tłumienia hałasu izolacyjność akustyczna klasycznych materiałów dźwiękoizolacyjnych jest wprost proporcjonalna do ich masy oraz grubości [1]. W konsekwencji, izolowanie hałasu niskoczęstotliwościowego wymaga stosowania ciężkich i grubych materiałów, co jest sprzeczne z nowoczesnymi trendami w projektowaniu, gdzie kluczowymi aspektami są lekkość oraz minimalizacja grubości stosowanych rozwiązań [2].

W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie budzą metamateriały akustyczne [3], a w zakresie izolacyjności, szczególnie metamateriały membranowe (ang. membrane-type acoustic metamaterial, MAM). Są to systemy składające się z napiętej elastycznej membrany na sztywnej ramie z dodatkowymi elementami, wykorzystywanymi do strojenia częstotliwości rezonansowej ustroju [4, 5]. Taka konstrukcja prowadzi do wystąpienia lokalnych rezonansów, które z kolei powodują powstawanie pasma częstotliwości dla którego nie występuje propagacja fal dźwiękowych [6]. Dzięki temu MAM wykazują doskonałe właściwości w zakresie izolacji dźwięków o niskich częstotliwościach [7-9].

Współczesne badania nad metamateriałami membranowymi wykazują ich duży potencjał w zakresie poprawy izolacyjności akustycznej. Naify i in. [10] zaprojektowali strukturę składającą się z masy przytwierdzonej sztywno do okrągłej membrany wykonanej z polieteroimidu, która została napięta na sztywnej ramie podporowej z żywicy epoksydowej. Poprzez zmianę temperatury termoformowania żywicy, w celu regulacji naprężenia, uzyskano strukturę wykazującą nawet 500 % wzrost izolacyjności akustycznej w porównaniu do przewidywań wynikających z prawa masy. Wyniki eksperymentalne oraz symulacyjne jednoznacznie potwierdziły skuteczność tego rodzaju struktur w tłumieniu dźwięku w zakresie niskich częstotliwości.

Z kolei Peng i in. [11] opracowali model numeryczny metamateriałów membranowych oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazały wysoką zgodność z wynikami eksperymentalnymi, potwierdzając skuteczność modelowania tego typu struktur w kontekście poprawy izolacyjności akustycznej. Prace te stanowią istotny wkład w rozwój technologii akustycznych metamateriałów membranowych i otwierają drogę do ich szerszego zastosowania w przemyśle oraz budownictwie.

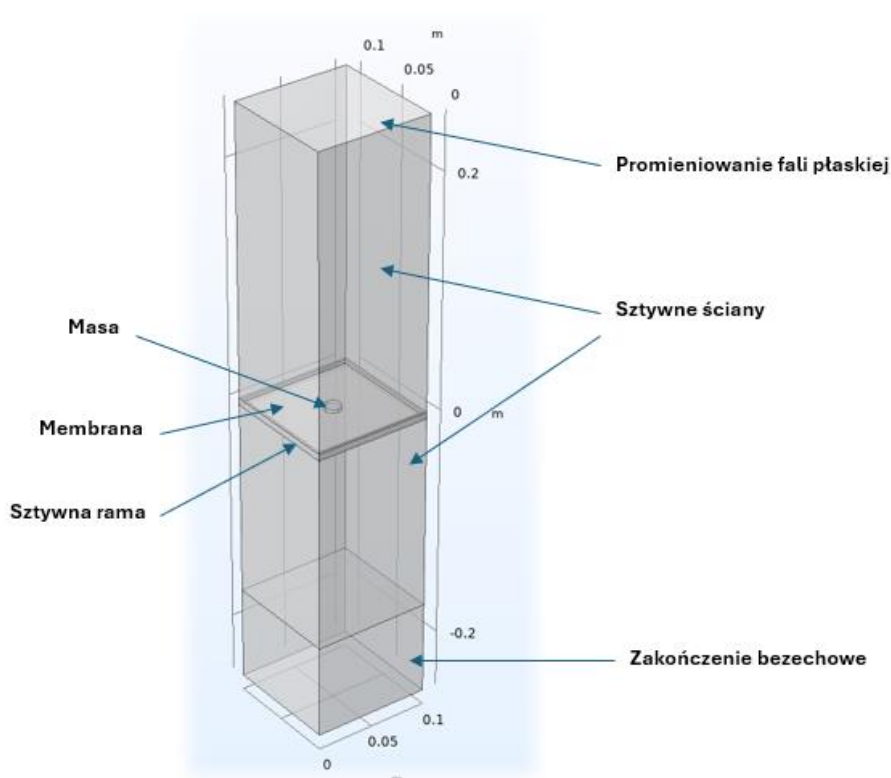
Celem projektu było zbadanie właściwości akustycznych metamateriałowych ustrojów membranowych oraz weryfikacja ich działania w tłumieniu dźwięku poprzez zastosowanie struktur wielokomórkowych. Główną częścią niniejszej pracy było opracowanie modelu numerycznego ustroju oraz jego walidacja. Istotnym elementem projektu była analiza możliwości tworzenia ustroju wielokomórkowego za pomocą łączenia równoległego i

szeregowego pojedynczych komórek, co pozwoliłoby na uzyskanie szerokopasmowej izolacyjności akustycznej.

Zakres prac obejmował również weryfikację eksperymentalną efektywności struktury, która została przeprowadzona poprzez pomiary w rurze impedancyjnej zgodnie z normą ASTM E2611-09. Dodatkowo, wykonano identyfikację kluczowych czynników determinujących właściwości akustyczne badanej struktury. Szczególną uwagę poświęcono aspektom materiałowym oraz geometrycznym, analizując ich wpływ na efektywność izolacyjną membranowego ustroju rezonansowego.

2. Model numeryczny do projektowania membranowych metamateriałów akustycznych

W niniejszej pracy zastosowano analizę metodą elementów skończonych (MES) przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics do stworzenia modelu komórki elementarnej MAM (Rysunek 1).



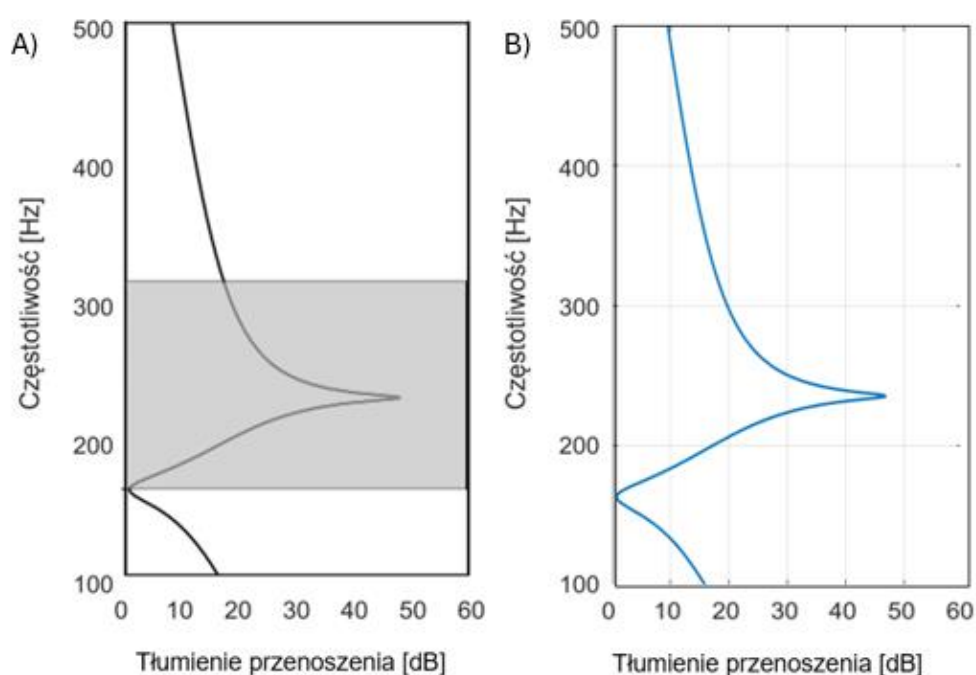
Rysunek 1. Wykonany model z wykorzystaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics

Części stałe obejmowały membranę o określonej grubości, długości boku oraz naprężeniu, masę o zadanym promieniu i wysokości, a także ramę o określonych wymiarach geometrycznych. Dla powierzchni transmitowanej zostały określone warunki brzegowe

promieniowania fali płaskiej, przy czym ciśnienie padającej fali ustalono na 1 Pa. Natomiast po stronie odbiorczej uwzględniono zakończenie materiałem o współczynniku pochłaniania równym 1.

Ze względu na wysoką złożoność obliczeniową oraz konieczność zmniejszenia czasu symulacji, membrana nie została zamodelowana jako trójwymiarowe ciało stałe o określonej grubości, ponieważ skutkowało to nadmiernym zagęszczeniem siatki i zawyżeniem wyników. Zamiast tego, w końcowym modelu zastosowano podejście powłokowe, w którym membranę uwzględniono jako powierzchnię o zadanej grubości. Takie rozwiązanie pozwoliło na uproszczenie geometrii poprzez eliminację wpływu rzeczywistej grubości w modelu numerycznym, przy jednoczesnym uwzględnieniu jej efektów w obliczeniach analitycznych.

Stworzony model został poddany walidacji poprzez porównanie jego wyników z danymi przedstawionymi w artykule [11]. Weryfikacja poprawności modelu została przeprowadzona przy użyciu identycznych parametrów materiałowych jak w badaniu referencyjnym. Na rysunku 2 przedstawiono zestawienie wyników uzyskanych dla opracowanego modelu oraz danych z literatury.



Rysunek 2. Porównanie wyników zawartych w artykule A) [11] oraz wyników wykonanego modelu B)

Otrzymane wyniki wykazały wysoką zgodność zarówno pod względem częstotliwości rezonansowych, jak i amplitud, co potwierdza poprawność przyjętych założeń podczas tworzenia modelu.

3. Pomiary pojedynczych komórek membranowych

W kolejnym etapie przeprowadzono walidację zaprojektowanego modelu poprzez pomiary w rurze impedancyjnej zgodnie z normą ASTM E2611-09 [12], wykorzystując czteromikrofonową metodę funkcji przejścia. Do pomiarów wykorzystano:

- wzmacniacz Brüel & Kjær Type 2716C,
- kartę pomiarową Brüel & Kjær Type 3160-A-042,
- cztery mikrofony ¼” G.R.A.S.,
- kalibrator Brüel & Kjær Type 4231,
- rurę impedancyjną B&K 4206T o średnicy 100 mm.

Pomiary umożliwiły wyznaczenie tłumienia przenoszenia (ang. *Transmission Loss*, TL), zdefiniowanego jako logarytmiczny stosunek mocy akustycznej fali padającej na próbkę do mocy fali transmitowanej przez próbkę [13]. Zgodnie z wytycznymi normy ASTM E2611-09, tłumienie przenoszenia dla danej częstotliwości f obliczono na podstawie wzoru 1:

$$TL(f) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{in}(f)}{P_{out}(f)} \right) \quad (1)$$

Gdzie:

- $P_{in}(f)$ oznacza moc akustyczną fali padającej na próbkę,
- $P_{out}(f)$ oznacza moc akustyczną fali transmitowanej przez próbkę.

W celu umożliwienia pomiaru próbek o kształcie kwadratu zaprojektowano i wydrukowano specjalną konstrukcję.

Eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem membrany wykonanej z folii o grubości 0,1 mm. Do membrany przymocowano masy o zróżnicowanych parametrach geometrycznych i masowych (Rysunek 3). Wprowadzono również modyfikacje konstrukcyjne, zmieniając kształt ramki z kwadratowego na okrągły, co umożliwiło pomiary w rurze impedancyjnej oraz zapewniło zgodność modelu z rzeczywistymi warunkami eksperymentalnymi.

Wykorzystane materiały:

- Membrana: folia PCV o grubości 0,1 mm, wymiarach 60 × 60 mm;
- Masa 1: średnica 11,6 mm, wysokość 5,4 mm, masa 2,4 g;
- Masa 2: średnica 16 mm, wysokość 2 mm, masa 0,9 g.

W ramach eksperymentu przeprowadzono pomiary dla pięciu wariantów obciążenia membrany:

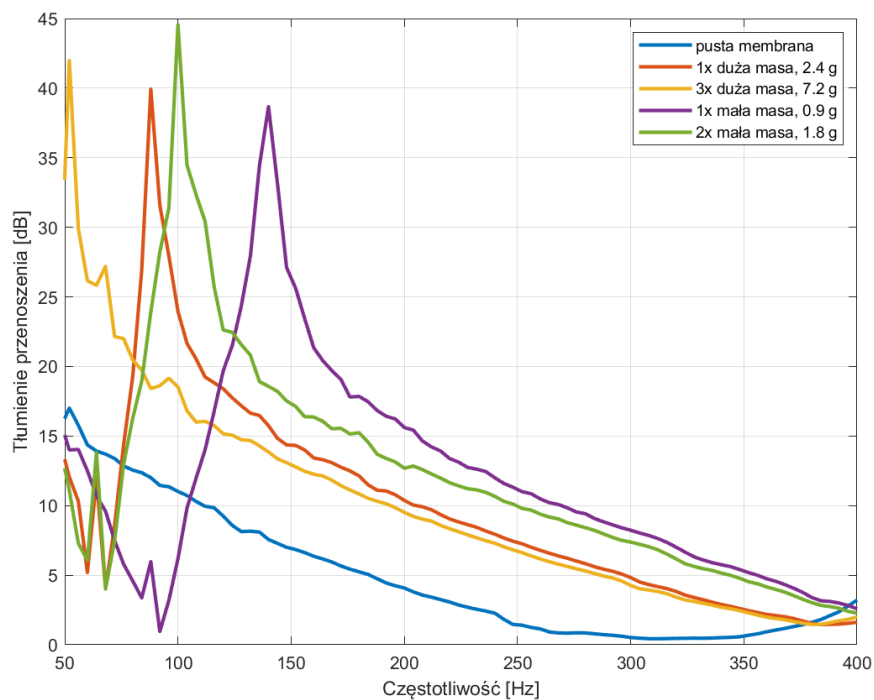
1. Membrana bez dodatkowego obciążenia;

2. Membrana z jedną dużą masą (Masa 1);
3. Membrana z trzema dużymi masami (3 x Masa 1);
4. Membrana z małą dużą masą (Masa 2);
5. Membrana z dwiema małymi masami (2 x Masa 2).



Rysunek 3. Zdjęcia gotowych ustrojów membranowych kolejno dla wariantu 1, 2

Wyniki pomiarów dla pięciu podanych wariantów zostały przedstawione poniżej na Rysunku 4.



Rysunek 4. Wyniki pomiarów dla wszystkich wariantów

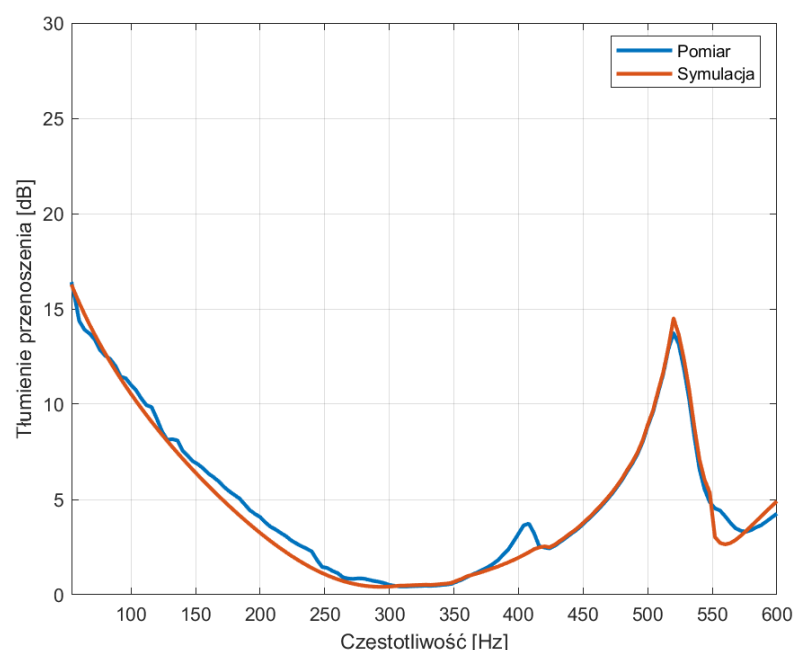
Analiza uzyskanych wyników wykazała istnienie zależności potwierdzających wcześniejsze przypuszczenia dotyczące wpływu masy na charakterystykę rezonansową membrany. Zaobserwowano, że zwiększenie wysokości masy prowadzi do obniżenia częstotliwości rezonansowej przy jednoczesnym zwiększeniu tłumienia przenoszenia, co jest zgodne z przewidywaniami teoretycznymi.

Ustrój z jedną małą masą wykazał częstotliwość rezonansową równą 145 Hz i tłumienie przenoszenia 38 dB. Przy podwojeniu wysokości masy (poprzez dołożenia drugiego identycznego elementu na poprzedni) częstotliwość szczytowa spadła do 101 Hz a tłumienie przenoszenia zwiększyło się o 8 dB.

Dodatkowo, warto zwrócić uwagę, że dodanie masy do nieobciążonej membrany wpłynęło na zwiększenie amplitudy drgań w określonych zakresach częstotliwości. Wyniki te potwierdzają teoretyczne modele opisujące charakterystyki rezonansowe membrany oraz wskazują na efektywność zastosowania tego typu metamateriałów w kontrolowaniu właściwości akustycznych układu.

W kolejnym etapie badań dokonano dopasowania modelu do uzyskanych wyników eksperymentalnych, uwzględniając niepewność parametrów materiałowych. Ze względu na brak dokładnych danych dotyczących właściwości zastosowanych materiałów, model był modyfikowany pod kątem parametrów takich jak naprężenie membrany oraz jej moduł Younga.

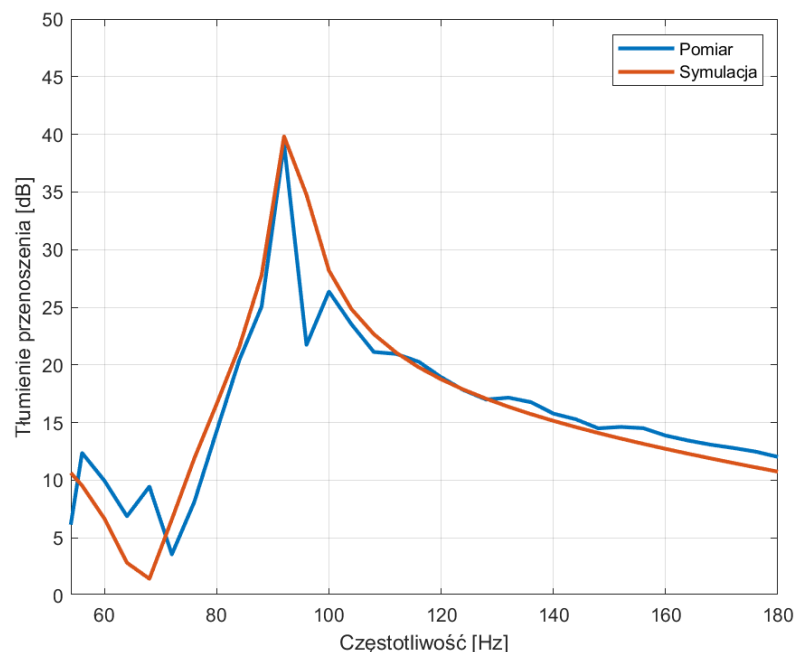
Pierwszy wykres (Rysunek 5) przedstawia charakterystykę strat przejścia dla samej membrany w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 600 Hz.



Rysunek 5. Sprawdzenie zgodności modelu z wynikami pomiarów dla samej membrany

Obserwuje się dobrą zgodność modelu z pomiarami, zarówno częstotliwości rezonansowej jak i wartości strat przenoszenia.

Rysunek 6 prezentuje wyniki dla membrany z jedną masą dla zakresu częstotliwości od 50 do 180 Hz. Wyraźnie widoczne jest występowanie rezonansu w okolicach 90 Hz, co zostało dobrze odwzorowane w modelu.

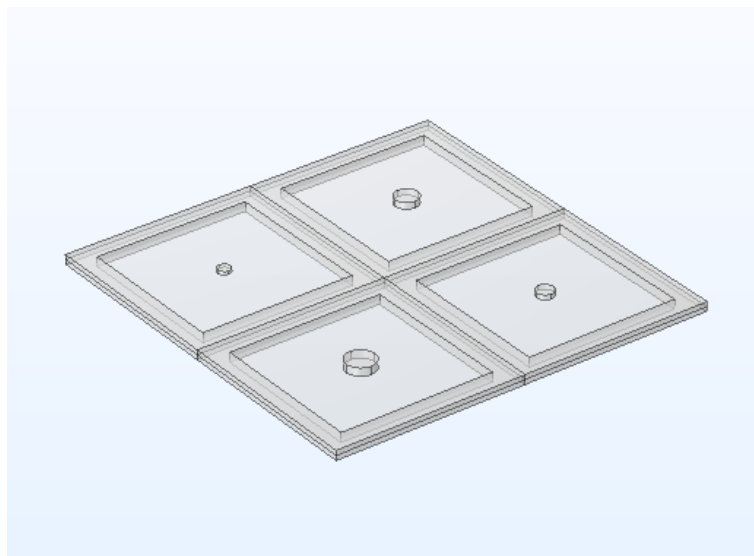


Rysunek 6. Sprawdzenie zgodności modelu z wynikami pomiarów dla membrany z jedną masą

Wykresy przedstawione na rysunkach 5 i 6 wskazują na wysoką zgodność wyników zastosowanego modelowania z pomiarami uzyskanymi eksperymentalnie. Model dobrze odwzorowuje rzeczywistą strukturę typu MAM i warunki przeprowadzonego eksperymentu.

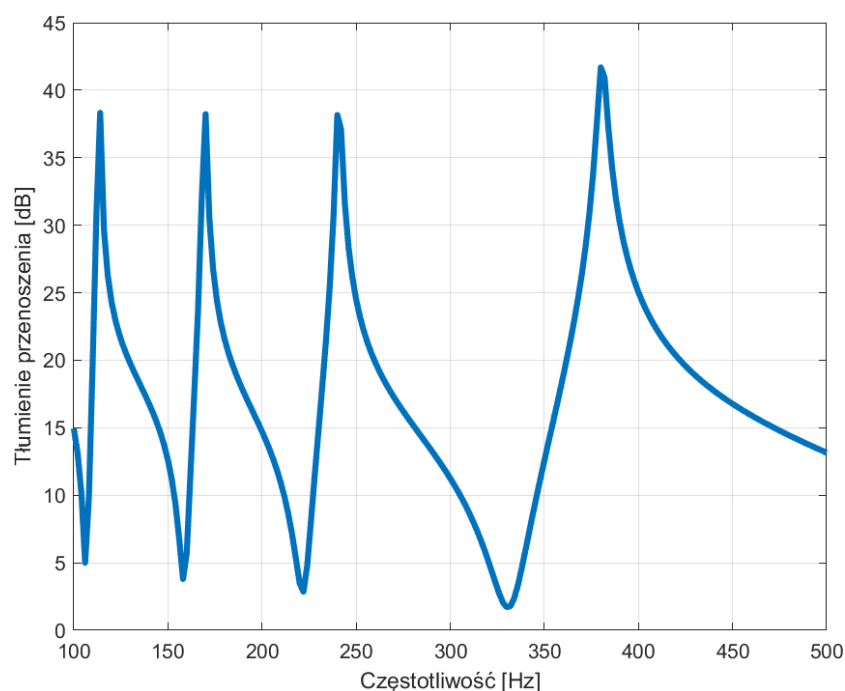
4. Metody łączenia komórek metamateriałów membranowych

Kolejnym etapem było zbadanie możliwości łączenia pojedynczych membran w ustrój wielokomórkowy. Pierwszym sposobem było ich połączenie w układzie równoległym (Rysunek 7). Każda z membran została indywidualnie dostrojona do innej częstotliwości rezonansowej poprzez odpowiedni dobór masy.



Rysunek 7. Łączenie membran w układzie równoległym

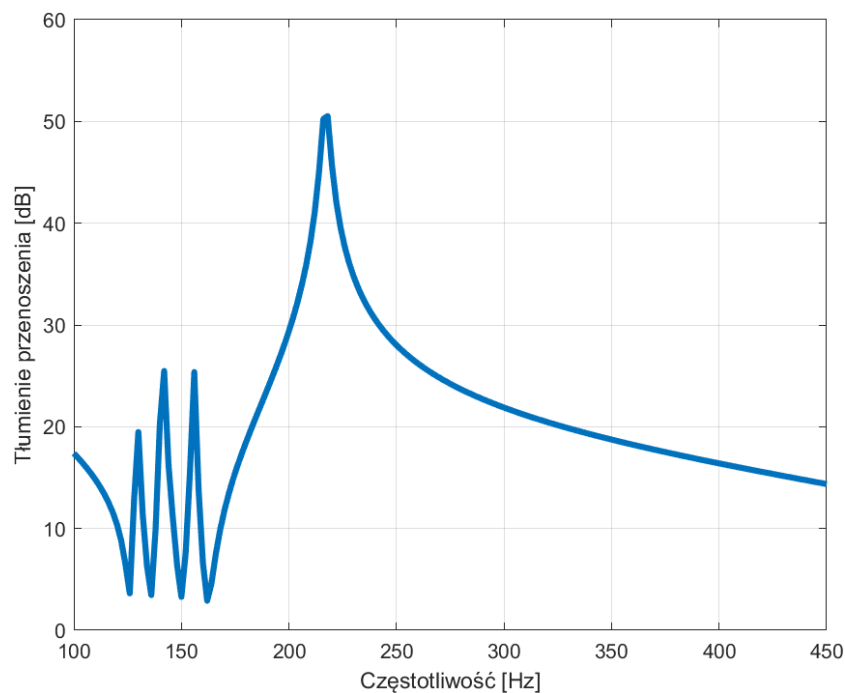
Wyniki symulacji dla układu wielokomórkowego przedstawiono na Rysunku 8.



Rysunek 8. Wyniki symulacji dla ustroju wielokomórkowego - łączenie równoległe

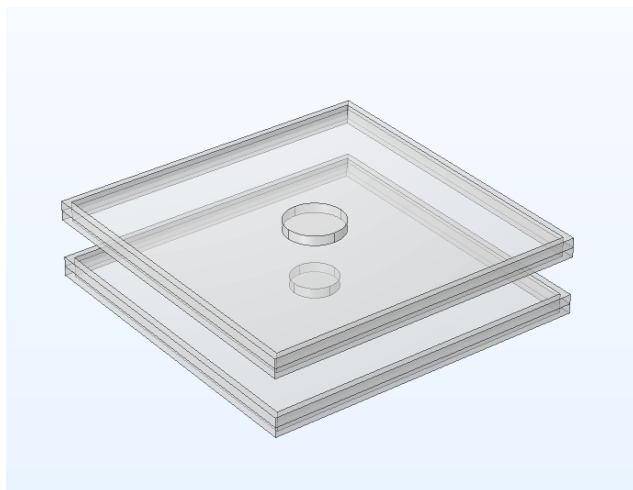
Na wykresie wyraźnie widoczne są cztery lokalne maksima, odpowiadające częstotliwościom rezonansowym poszczególnych membran. W efekcie uzyskano strukturę o poszerzonym zakresie tłumienia dla konkretnie wskazanych częstotliwości.

Istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność tłumienia jest jednak odpowiednie dobranie częstotliwości rezonansowych poszczególnych membran. W przypadku, gdy częstotliwości te znajdują się zbyt blisko siebie, mogą wystąpić wzajemne oddziaływania między membranami. Prowadzi to do znacznego obniżenia skuteczności tłumienia w tych zakresach częstotliwości, co ogranicza efektywność całego układu. Na Rysunku 9 przedstawiono przykład, w którym niewłaściwe dostrojenie częstotliwości rezonansowych prowadzi do zmiany charakterystyki tłumienia.



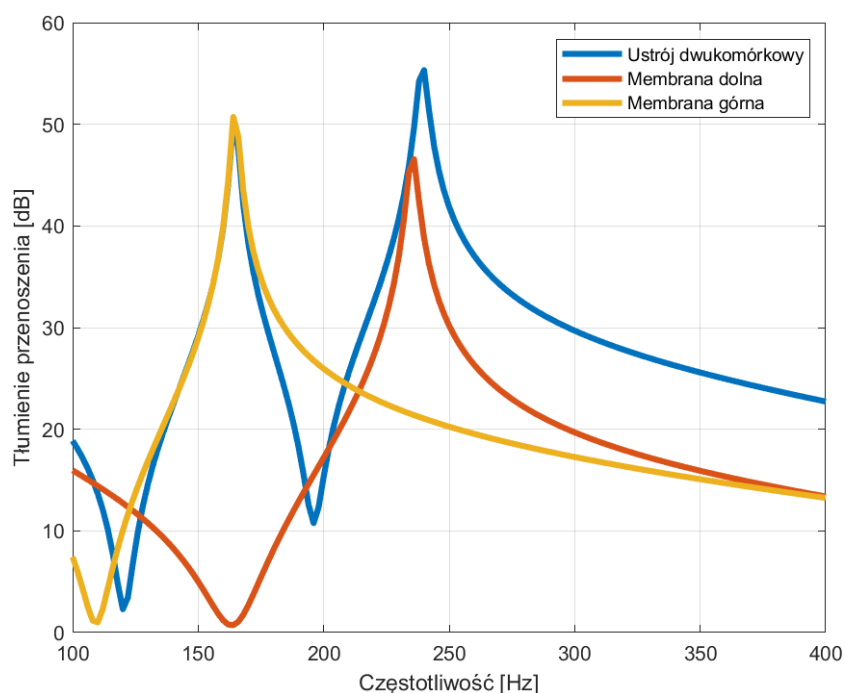
Rysunek 9. Wyniki symulacji dla ustroju wielokomórkowego, przy źle dobranych częstotliwościach rezonansowych - łączenie równoległe

Drugim przeanalizowanym rozwiązaniem było połączenie membran w konfiguracji szeregowej. Zasympulowano układ składający się z dwóch membran dostrojonych do różnych częstotliwości rezonansowych (Rysunek 10).



Rysunek 10. Łączenie membran w układzie szeregowym

Zachowano między nimi odpowiednią odległość, aby zapewnić minimalizację wzajemnych oddziaływań i uniknąć zakłóceń w pracy membrany znajdującej się w górnej warstwie. Wyniki symulacji dla tej konfiguracji przedstawiono na Rysunku 11.



Rysunek 11. Wyniki symulacji dla ustroju wielokomórkowego - łączenie szeregowe

Na wykresie widoczne są dwa lokalne maksima, odpowiadające częstotliwościom rezonansowym poszczególnych membran. Taka konfiguracja zapewnia poszerzenie zakresu skutecznego tłumienia dźwięku, przy jednoczesnym zminimalizowaniu wzajemnych oddziaływań pomiędzy membranami. Kluczowym czynnikiem w układzie szeregowym jest odpowiednia odległość między komórkami, która zapobiega zakłóceniom pracy membrany znajdującej się w górnej warstwie.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczyły zastosowania metamateriałowych membranowych ustrojów rezonansowych w celu poprawy izolacyjności akustycznej, ze szczególnym uwzględnieniem tłumienia w zakresie niskich częstotliwości. W ramach pracy opracowano model numeryczny metamateriałowego układu membranowego, który następnie został poddany walidacji na podstawie danych dostępnych w literaturze. Skuteczność zastosowanego modelu potwierdzono również eksperymentalnie, wykorzystując pomiary przeprowadzone zgodnie z normą ASTM E2611-09. Dodatkowo przeanalizowano możliwość łączenia pojedynczych membran w układ wielokomórkowy, zarówno w konfiguracji równoległej, jak i szeregowej. Analiza przeprowadzonych badań potwierdziła, że zastosowanie membranowych metamateriałów akustycznych umożliwia efektywną izolację dźwięków w zakresie niskich częstotliwości, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej masy i kompaktowych wymiarów

struktury. Ponadto wyniki dotyczące konfiguracji wielokomórkowej dowiodły, że odpowiednie dostrojenie częstotliwości rezonansowych i umiejscowienie poszczególnych membran stanowi skuteczny sposób na poszerzenie zakresu tłumienia i poprawę właściwości izolacyjnych całego układu.

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano skuteczny ustrój, który znacząco poprawia izolacyjność akustyczną w zakresie niskich częstotliwości. Zastosowanie indywidualnie dostrojonych membran w konfiguracji równoległej pozwoliło na poszerzenie zakresu tłumienia dzięki uzyskaniu kilku lokalnych maksimów odpowiadających różnym częstotliwościom rezonansowym. Z kolei konfiguracja szeregową umożliwiła minimalizację wzajemnych oddziaływań między membranami, co przełożyło się na stabilniejsze i bardziej efektywne tłumienie. Ostatecznie uzyskano strukturę o niskiej masie i kompaktowych wymiarach, zdolną do skutecznej izolacji dźwięków w szerokim zakresie częstotliwości, co potwierdzono zarówno symulacjami numerycznymi, jak i badaniami eksperymentalnymi.

6. Literatura

- [1] *Acoustic and Thermal Insulating Materials*, Building Decorative Materials, pp. 359–374, 2011.
- [2] M. J. White, G. W. Swenson, T. A. Borrowman, and J. D. Borth, *Low-frequency sound propagation in porous media: Glass spheres and pea gravel*, Applied Acoustics, vol. 73, no. 11, pp. 1146–1149, Nov. 2012.
- [3] W. Q. Wu, Y. Bin Zhang, L. Xu, L. X. Zhao, and T. G. Chen, *Design and evaluation of an acoustic metamaterial for ducted fan noise control*, Applied Acoustics, vol. 233, p. 110612, Mar. 2025.
- [4] S. Li, D. Mao, S. Huang, and X. Wang, *Enhanced transmission loss in acoustic materials with micro-membranes*, Applied Acoustics, vol. 130, pp. 92–98, Jan. 2018.
- [5] Z. A. Yang, Y. J. Chen, X. Y. Hu, and R. H. Bao, *Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass*, Phys Rev Lett, vol. 20, no. 101, 2008.
- [6] Y. Zhang, J. Wen, Y. Xiao, X. Wen, and J. Wang, *Theoretical investigation of the sound attenuation of membrane-type acoustic metamaterials*, Phys Lett A, vol. 376, no. 17, pp. 1489–1494, Mar. 2012.
- [7] M. Yang, S. Chen, C. Fu, and P. Sheng, *Optimal sound-absorbing structures*, Mater Horiz, vol. 4, no. 4, pp. 673–680, 2017.

- [8] G. Ma and P. Sheng, *Acoustic metamaterials: from local resonances to broad horizons*, Sci Adv, vol. 2, no. 2, 2016.
- [9] Z. Zhao, Y. Chen, X. Hu, R. Bao, B. Wu, and W. Chen, *Vibrations and waves in soft dielectric elastomer structures*, Feb. 01, 2023.
- [10] C. J. Naify, C. M. Chang, G. McKnight, and S. Nutt, *Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally resonant acoustic metamaterials*, J Appl Phys, vol. 108, no. 11, Dec. 2010.
- [11] W. Peng, J. Zhang, M. Shi, J. Li, and S. Guo, *Low-frequency sound insulation optimisation design of membrane-type acoustic metamaterials based on Kriging surrogate model*, Mater Des, vol. 225, Jan. 2023
- [12] ASTM E2611-09: *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*.
- [13] D. Caballol and Á. P. Raposo, *Analysis of the measurement of transmission loss in rigid building materials with a standing wave tube*, Constr Build Mater, vol. 182, pp. 242–248, Sep. 2018.

PROJEKTOWANIE I ANALIZA DŹWIĘKOIZOLACYJNYCH METAMATERIAŁÓW AKUSTYCZNYCH TYPU SOFT SOLID Z WTRĄCENIAMI PERIODYCZNYMI

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

amaciuszek@student.agh.edu.pl

Streszczenie

Metamateriały wibroakustyczne przyjmują różne formy i mają różnorodne zastosowania. Jednym z nich jest zwiększanie izolacyjności akustycznej w zakresach, w których tradycyjne materiały jednorodne dają niewystarczające efekty. Aby osiągnąć taki efekt, należy wpłynąć na fale rozchodzące się w elemencie podstawowym poprzez rozmieszczenie w odpowiednich odstępach na dostępnej powierzchni elementy rezonansowe. W pracy analizie poddano metamateriały wibroakustyczne oparte na strukturze soft solid wraz z periodycznymi wtrąceniami, składające się z materiału porowatego oraz cyklicznych elementów wykonanych z materiału jednorodnego. Dodane wtrącenia do materiału porowatego umożliwiają poszerzenie możliwości struktury w kontekście izolacyjności akustycznej. Efektywność struktury zależy zarówno od parametrów materiałowych jak i geometrycznych wykorzystanego materiału porowatego i ciała stałego. Wykonany został model w programie COMSOL, który uwzględnia interakcję domeny akustycznej z ciałem stałym. Analizie poddano wpływ zmian parametrów materiałowych oraz geometrycznych, takich jak grubość materiału porowatego, kształt wtrąceń oraz ich wypełnienie, na efektywność struktury. Bazując na wynikach symulacji numerycznych dobrano materiały o odpowiednich parametrach i wykonano prototyp opisanej wyżej struktury. Dla prototypu przeprowadzono pomiary izolacyjności akustycznej w polu rozproszonym w celu weryfikacji efektywności struktury.

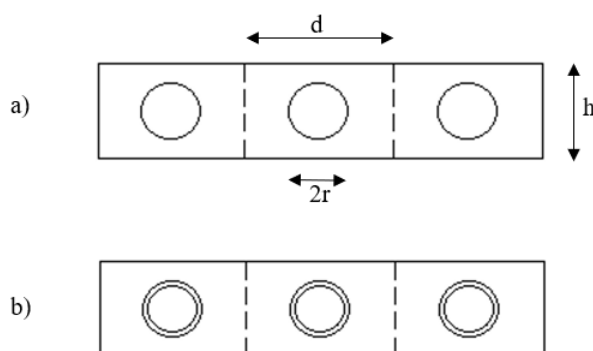
1. Wstęp

We współczesnym świecie hałas w przemyśle staje się coraz większym problemem [1], dlatego stale opracowywane są różnorodne metody jego redukcji, jako że stosowanie tradycyjnych materiałów nie zawsze jest skuteczne. Szczególnie w paśmie niskich częstotliwości zastosowanie materiałów jednorodnych często nie daje zamierzonych efektów, dlatego coraz bardziej zwiększa się zainteresowanie alternatywnymi rozwiązaniami, takimi jak metamateriały akustyczne [2]. Metamateriały są to struktury, które dzięki swojej unikalnej

strukturze mogą osiągać zdecydowanie korzystniejsze wyniki w porównaniu do materiałów tradycyjnych. Ich cechą charakterystyczną jest zależność skuteczności nie tylko od parametrów materiałowych, ale w dużej mierze od ich geometrii [3, 4]. Nie są one ograniczone prawem masy, są bardzo skuteczne w tłumieniu niskich częstotliwości zachowując jednocześnie niewielki wymiary oraz wagę. Dodatkową zaletą metamateriałów jest możliwość nastrojenia struktury na tłumienie wybranej częstotliwości poprzez zmianę ich geometrii [5]. Zagadnienie metamateriałów jest stosunkowo nowe, dlatego wciąż prowadzone są na ten temat badania [6]. W tej pracy skupiono się na analizie własności metamateriału typu *soft solid* z periodycznymi wtrąceniami rezonansowymi, zaprojektowanego w celu zwiększenia izolacyjności w paśmie niskich częstotliwości [7, 8]. Analizę przeprowadzono na podstawie symulacji wykonanego modelu w programie COMSOL oraz pomiarów. Opierając się na wynikach symulacji porównano wpływ zmian geometrii struktury, zmiany średnicy wtrąceń, ich wypełnienie oraz gęstości ich rozłożenia, na jej właściwości akustyczne. Następnie wybrano jeden wariant geometryczny struktury, na którego podstawie skonstruowano próbkę pomiarową w celu przeprowadzenia walidacji pomiarowej wykonanych symulacji.

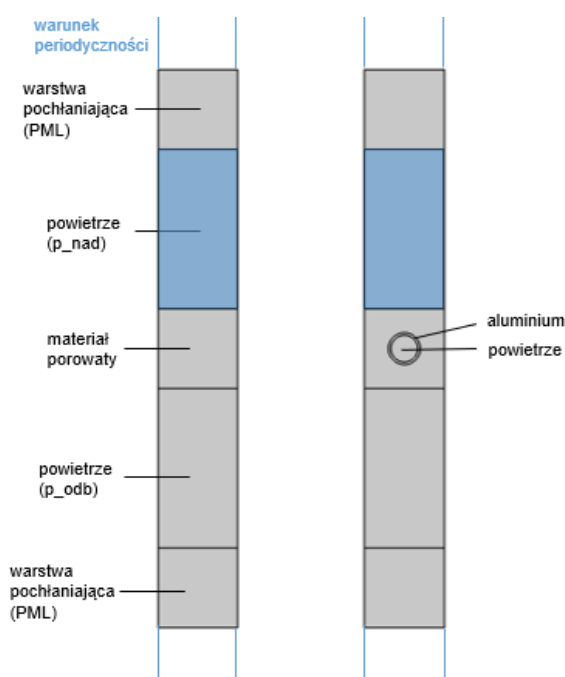
2. Przebieg symulacji

W programie COMSOL wykonano model struktury *soft solid* z periodycznymi wtrąceniami w kilku różnych wariantach geometrycznych. Różniły się one między sobą wymiarem średnicy wtrąceń, gęstością ich rozłożenia oraz wypełnieniem. Wykonany model wykorzystano do analizy izolacyjności struktury za pomocą wartości tłumienia przenoszenia. Badania przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych. Na Rysunku 1 przedstawiono poglądowo fragment struktury z a) wtrąceniami wypełnionymi oraz b) z wtrąceniami pustymi w środku.



Rysunek 1 Schemat fragmentu struktury dla 2 wariantów: z a) wypełnionymi wtrąceniami oraz b) wtrąceniami pustymi w środku

Materiał podstawowy, którym jest materiał porowaty, zamodelowano jako ciało stałe, wartości parametrów materiałowych przyjmując jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych wartości materiału porowatego. Natomiast parametry materiałowe wtrąceń zostały przyjęte jako wartości odpowiadające aluminium. We wszystkich przeprowadzonych symulacjach szerokość struktury przyjęta była jako 30 mm. Model po obu stronach zakończony był warstwą cechującą się współczynnikiem pochłaniania równym jeden. (ang. PML – *Perfectly Matched Layer*), wymuszenie zostało wprowadzone jako warunek symulujący falę płaską po jednej stronie struktury, zaznaczonej kolorem niebieskim na Rysunku 2. Wartości parametrów materiałowych materiału porowatego oraz aluminium przyjęte podczas symulacji zostały przedstawione w tabeli 1.



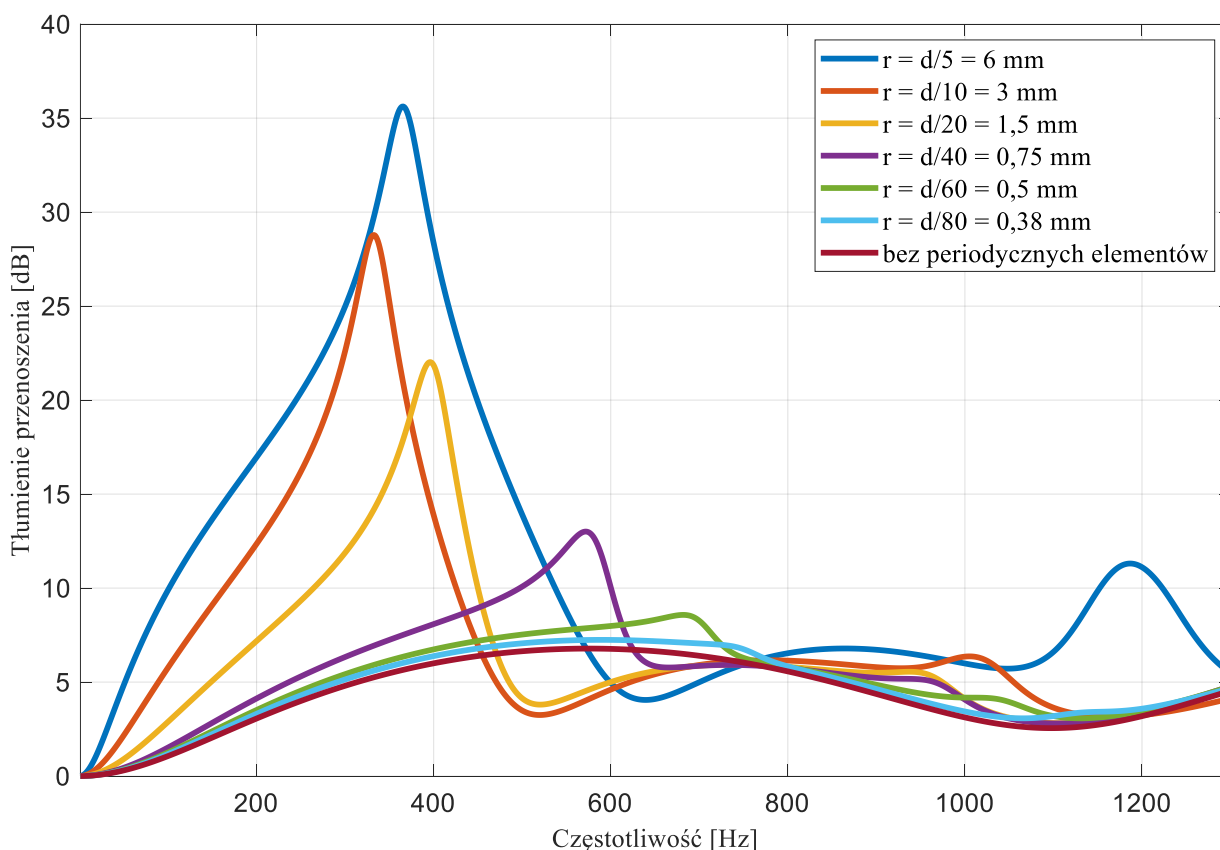
Rysunek 2 Schemat modelu wykonanego w programie COMSOL dla dwóch wariantów: samego materiału porowatego oraz materiału porowatego z wtrąceniami

Tabela 1 Parametry materiałów użyte w symulacjach w programie COMSOL

Parametry materiału soft solid	
Moduł Younga	50 GPa
Liczba Poissona	0,4
Gęstość	24,6 kg/m ³
Tłumienie	0,1
Parametry wtrąceń aluminiowych	
Moduł Younga	70 GPa
Liczba Poissona	0,33
Gęstość	2700 kg/m ³
Tłumienie	0,001

3. Wyniki symulacji

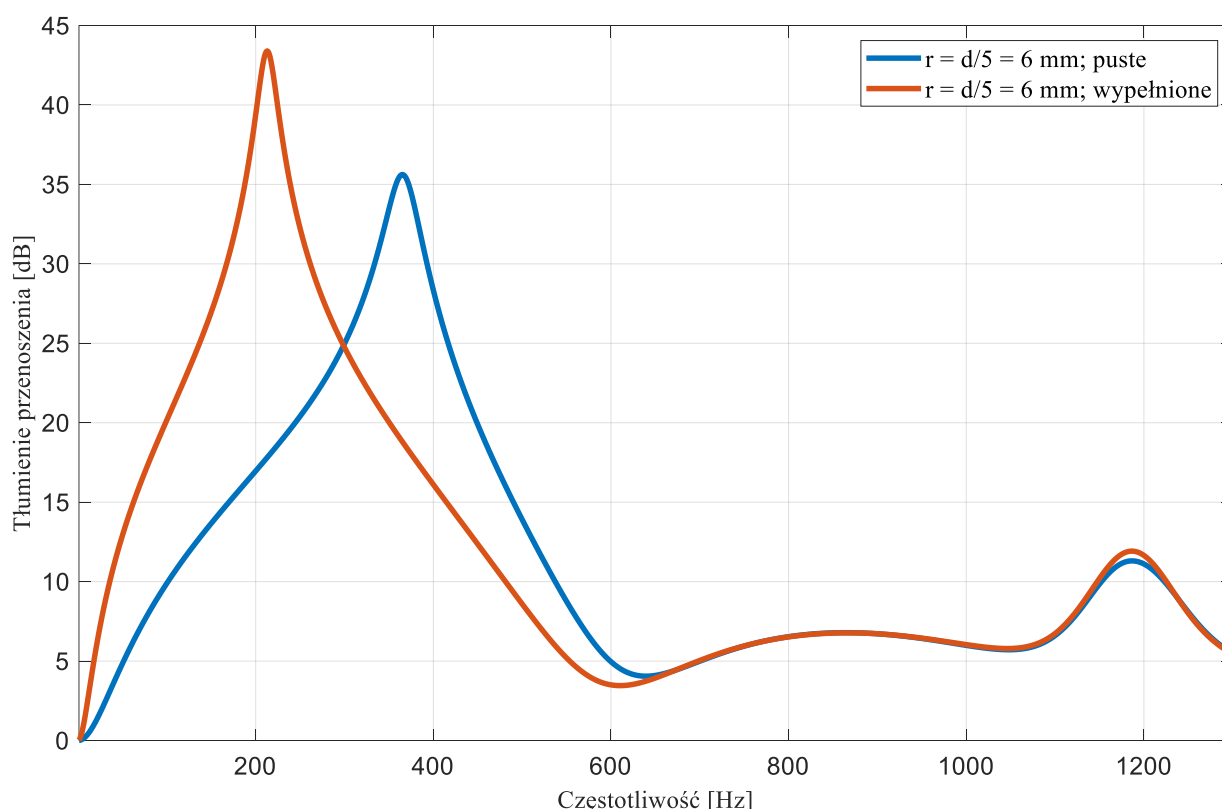
Wyniki symulacji przeprowadzonej z użyciem oprogramowania COMSOL przedstawiono na wykresach poniżej. Symulacje przeprowadzane były w zakresie częstotliwości 1 – 1300 Hz. Pierwszym analizowanym porównaniem był wpływ różnicy wymiarów średnicy na wartości tłumienia przenoszenia dla analizowanej struktury, przedstawionym na Rysunku 3. Wtrącenia dla wszystkich przypadków rozmieszczone były w odległości 30 mm od siebie. Dla średnicy większej niż 1,5 mm wtrącenia zamodelowane zostały jako puste w środku o szerokości ścianki równej 1 mm, natomiast z powodu małych rozmiarów dla pozostałych przypadków wtrącenia były wypełnione. Przy sukcesywnym zwiększaniu średnicy wtrąceń, zauważono stopniowy wzrost tłumienia w paśmie 200 – 400 Hz. Struktura o największej średnicy osiągała najwyższe wartości w tym paśmie, z maksymalną wartością powyżej 35 dB dla częstotliwości ok. 350 Hz. Jest to wyraźny wzrost wartości w stosunku do jednorodnej pianki, dla której wartości w tym przedziale oscylowały między 3 dB a 7 dB.



Rysunek 3 Wykresy przedstawiające wartości tłumienia przenoszenia dla wariantów struktury różniących się wymiarem średnicy wtrąceń

Kolejnym wykonanym zestawieniem było porównanie struktury *soft solid* z wtrąceniami o stałej średnicy 6 mm, natomiast różniących się wypełnieniem. W pierwszym

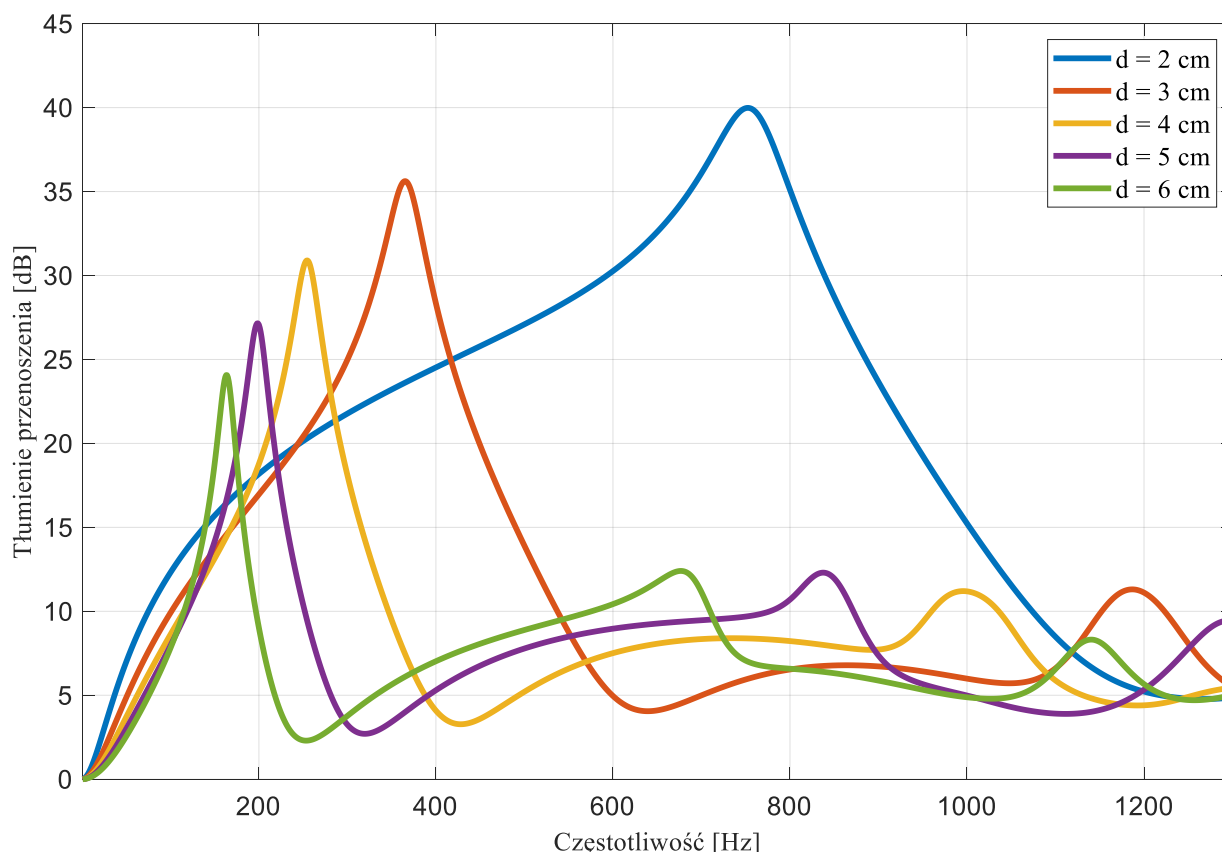
wariacie rurki aluminiowe były puste w środku, szerokość ich ścianek wynosiła 1 mm, natomiast w drugim przypadku wtrącenia były pełne. Dla obu przypadków odległość między wtrąceniami wynosiła 30 mm. Na podstawie wykresu przedstawionego na Rysunku 4, można zauważyć, że wartości tłumienia dla pełnych wtrąceń osiągają wyższą wartość maksymalną o prawie 10 dB, natomiast dla częstotliwości niższej niż struktura z wtrąceniami pustymi w środku. Wartość maksymalna osiągnięta dla struktury z wtrąceniami wypełnionymi wynosiła ok. 43 dB dla częstotliwości ok. 210 Hz. Jednak, mimo że są to wartości korzystniejsze od tych otrzymanych dla wariantu drugiego, należy pamiętać o aspekcie konstrukcyjnym, mianowicie w przypadku zastosowania rurek wypełnionych znacznie wzrasta waga całego ustroju.



Rysunek 4 Wykresy przedstawiające wartości tłumienia przenoszenia dla struktury z wtrąceniami wypełnionymi oraz pustymi w środku

Ostatnim wykonanym porównaniem było zestawienie struktur, w których zachowano stałe wymiary wtrąceń aluminiowych, ich średnica wynosiła 6 mm, były puste w środku, o szerokości ścianki 1 mm, natomiast zmienną wartością była odległość między wtrąceniami. Poddano analizie przypadki, kiedy wtrącenia były oddalone od siebie o 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm oraz 60 mm. Wyniki symulacji przedstawiono na Rysunku 5. Na wykresie zaobserwowano wzrost wartości maksymalnej tłumienia przenoszenia osiąganą przez strukturę wraz ze wzrostem odległości między wtrąceniami. Jednak istotnym elementem analizy jest fakt, że wraz ze wzrostem wartości maksymalnej, zwiększała się również

częstotliwość, dla której ta wartość była osiągana. Struktura z wtrąceniami rozmieszczonymi co 20 mm osiągnęła najwyższą wartość maksymalną równą 40 dB, dla częstotliwości ok. 750 Hz. Jednak, jako że celem pracy było skonstruowanie struktury metamateriałowej skutecznie izolującej w paśmie niskich częstotliwości, dlatego z wariantów przeanalizowanych w tym zestawieniu, najbardziej korzystnym dla takiego założenia jest wariant z wtrąceniami rozstawionymi w odległości 30 mm.



Rysunek 5 Wykresy przedstawiające wartości tłumienia przenoszenia dla wariantów struktury różniących się gęstością rozłożenia wtrąceń

4. Przeprowadzenie pomiarów

W celu zweryfikowania wyników otrzymanych po wykonaniu symulacji w programie COMSOL, skonstruowano próbkę badawczą w celu doświadczalnego wyznaczenia właściwości izolujących struktury. Wybrano jeden wariant geometryczny struktury ze względu na przewidywane najlepsze parametry poprawy tłumienia przegrody w zakresie niskich częstotliwości. Wybór ten został uwarunkowany wynikami symulacji oraz względami praktycznymi podczas wykonywania konstrukcji. Na podstawie wybranego wariantu sporządzono próbkę pomiarową, wykonaną z pianki akustycznej o wymiarach 450 x 500 mm

o szerokości 30 mm oraz 18 prętów aluminiowych o średnicy 6 mm oraz szerokości ścianki 1 mm. Wzdłuż dłuższej krawędzi pianki wycięto otwory rozmieszczone co 30 mm, w które wprowadzono następnie pręty. Zdjęcie wykonanej struktury przedstawiono na Rysunku 6. Po skonstruowaniu próbki przeprowadzono pomiary w oknie pomiarowym w komorze pogłosowej w Laboratorium Akustyki Technicznej w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na podstawie procedur stanowiących dokumentację techniczną stanowiska [9]. Sygnałem wykorzystanym w pomiarach był szum, w celu uzyskania przejrzystych wyników uśredniono wyniki do wartości dla środkowych pasm częstotliwości 1/24 oktaawowych. Wartości tłumienia przenoszenia wyznaczone zostały na podstawie różnicy poziomu ciśnienia akustycznego w komorze pogłosowej małej, w której zlokalizowane było źródło dźwięku i mikrofon oraz w komorze pogłosowej dużej, gdzie wyniki pomiaru uśrednione były z sześciu mikrofonów. Współczynnik izolacyjności akustycznej obliczany jest według wzoru:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} [dB], \quad (1)$$

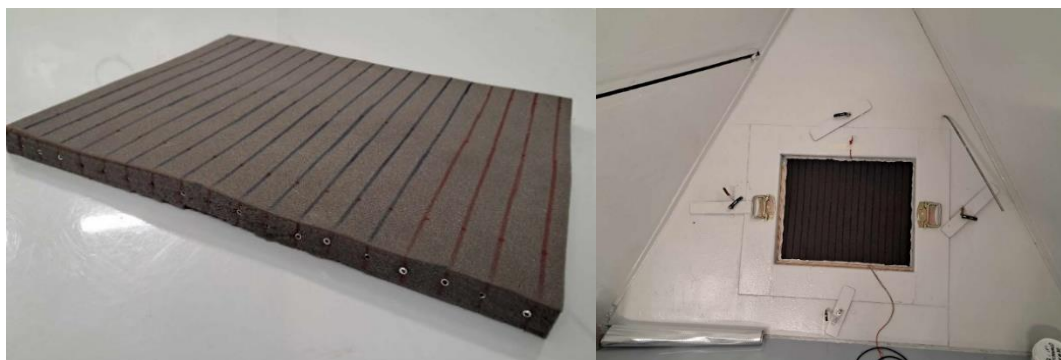
gdzie:

L_1 – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym [dB],

L_2 – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym [dB],

S – pole powierzchni próbki [m^2]

A – równoważne pole dźwiękochłonne próbki [m^2].



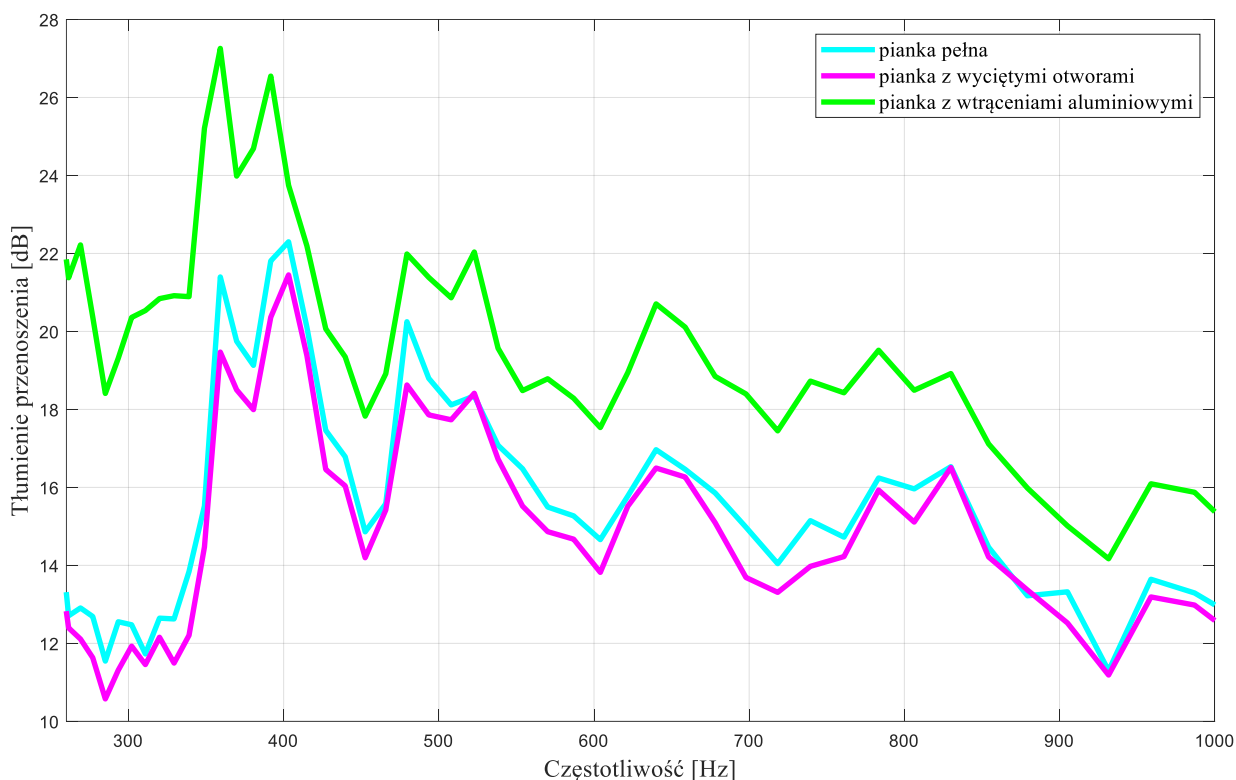
Rysunek 6 Zdjęcie próbki pomiarowej oraz okna pomiarowego w komorze pogłosowej wraz z zamontowaną próbką podczas pomiarów

5. Wyniki pomiarów

Przeprowadzono dwa etapy pomiarów. W obu etapach podmiotem pomiarów była wykonana próbka pomiarowa, natomiast różnica polegała na zastosowaniu folii samoprzylepnej podczas drugiego etapu pomiarów. Folię przyklejono po obu stronach próbki,

w celu zwiększenia ilość energii drgań przekazywanych dzięki niej na piankę. Dzięki temu uzyskany efekt przy użyciu pianki akustycznej zbliżony jest do efektu możliwego do uzyskania przy użyciu ciała stałego.

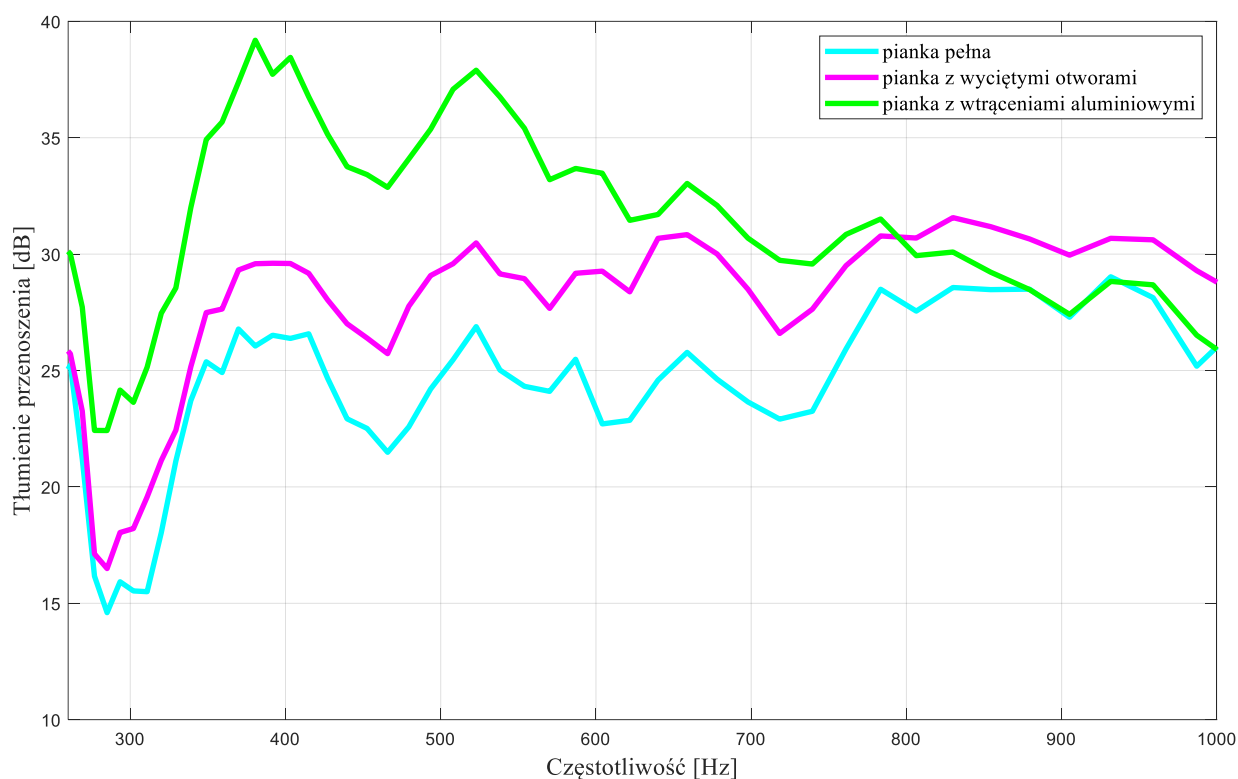
Podczas pierwszego etapu badań wykonano trzy serie badań. Na początku przeprowadzono badania dla wyżej opisanej próbki (pianki akustycznej wraz z umieszczonymi w niej aluminiowymi prętami), następnie dla pianki z wyciętymi w niej otworami, ale bez umieszczonych w niej wtrąceń oraz dla pianki jednorodnej. Wyniki pomiarów dla pasma częstotliwości 260 – 1000 Hz zostały przedstawione na Rysunku 7.



Rysunek 7 Wyniki pierwszego etapu pomiarów dla 3 wariantów: pianki jednorodnej, pianki z wyciętymi otworami oraz dla pianki a wtrąceniami periodycznymi

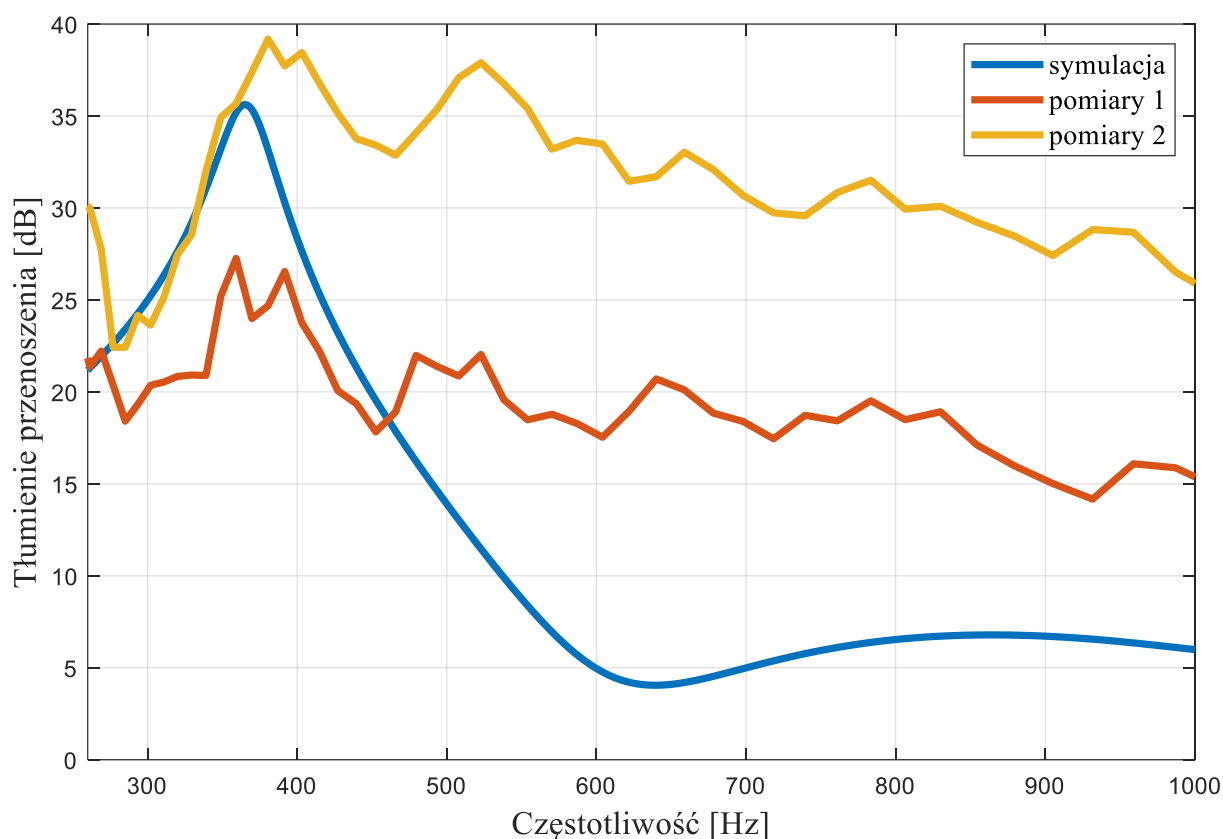
Wartości otrzymane podczas pomiarów potwierdzają wnioski wyciągnięte na podstawie symulacji. Zaobserwowano znaczny wzrost wartości tłumienia przenoszenia dla struktury w paśmie ok. 300 – 450 Hz dla badanej struktury w stosunku do wartości otrzymanych dla pianki jednorodnej. Wartość maksymalna dla struktury osiągnęła wartość przekraczającą 27 dB dla częstotliwości ok 350 Hz. Kolejny etap pomiarów przeprowadzono dla tych samych trzech wariantów jak w etapie pierwszym, elementem różniącym oba etapy była obecność folii naklejonej po obu stronach próbki. Wyniki etapu drugiego pomiarów przedstawiono na Rysunku 8. W etapie drugim pomiarów, podobnie jak w etapie pierwszym, zaobserwowano zdecydowany wzrost wartości tłumienia przenoszenia w paśmie niskich częstotliwości,

natomiast w tym przypadku wartości maksymalne osiągały wyraźnie wyższe wartości. Poprzez modyfikację próbki pomiarowej, struktura osiąga wartości tłumienia przekraczające 35 dB w paśmie ok. 300 – 450 Hz.



Rysunek 8 Wyniki pomiarów dla drugiego etapu pomiarów dla 3 wariantów: pianki jednorodnej, pianki z wyciętymi otworami oraz pianki z wtrąceniami periodycznymi

Na Rysunku 9 przedstawiono porównanie wyników symulacji oraz obu etapów pomiarów. Pasmo częstotliwości, w których wszystkie wykresy osiągają wartości szczytowe jest to sobie bardzo zbliżone, jest to ok. 200 – 400 Hz, natomiast wartości tłumienia przenoszenia się od siebie znacznie różnią. Największa różnica występuje w tym paśmie między wartościami dla etapu pierwszego oraz drugiego, wynosi ona niemal 10 dB. Zjawisko takie zachodzi, gdyż folia naklejona na powierzchnię materiału porowatego zapobiega przedostawaniu się części energii fali akustycznej bezpośrednio przez przestrzeń powietrzną w nim występującą, dzięki czemu pianka akustyczna może być rozważana jako elastyczne ciało stałe [10]. Dla wyników symulacji oraz drugiego etapu pomiarów wartości w przedziale ok. 280 – 380 Hz są do siebie bardzo zbliżone, natomiast w częstotliwościach wyższych od 400 Hz wyniki te mocno do siebie odbiegają, co wynika z faktu, że w programie COMSOL nie była uwzględniona sztywność materiału porowatego.



Rysunek 9 Porównanie wyników symulacji oraz dwóch etapów pomiarów

6. Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę struktury *soft solid* z periodycznymi wtrąceniami z użyciem symulacji wykonanych za pomocą modelu skonstruowanego w programie COMSOL, a następnie przeprowadzono weryfikację pomiarową otrzymanych wyników za pomocą wykonanej próbki pomiarowej. Wykonano pomiary w dwóch etapach, co umożliwiło nie tylko zbadanie samej próbki, ale również zbadanie wpływu folii naklejonej po obu stronach próbki. Wnioski wyciągnięte na podstawie symulacji zostały podparte wynikami pomiarów. Jako że temat metamateriałów jest coraz częściej poruszany, zakres ich zastosowań coraz bardziej poszerzany, zagadnienie omówione w pracy może być rozwinięty na wiele sposobów. W najbliższej przyszłości planowane jest rozszerzenie analizy o przeprowadzanie optymalizacji wymiarów geometrycznych struktury, wliczając w to wymiary przyjęte w tej pracy jako stałe, a następnie na podstawie jej wyników wykonanie nowej próbki pomiarowej oraz jej pomiarowa weryfikacja.

Literatura

- [1] Karpińska, K., Jaguszewski, D., Kosowska, G., & Nowakowicz-Dębek, B. Zagrożenie hałasem w środowisku pracy operatora ładowarki czołowej. *Wybrane zagadnienia z zakresu ochrony i zagrożeń środowiska*.
- [2] Ma, G., & Sheng, P. (2016). Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons. *Science advances*, 2(2)
- [3] N. Gao, Z. Zhang, J. Deng, X. Guo, B. Cheng, H. Hou, Acoustic Metamaterials for Noise Reduction: A Review. *Adv. Mater. Technol.* 2022
- [4] Brunet, T., Merlin, A., Mascaró, B. *et al.* Soft 3D acoustic metamaterial with negative index. *Nature Mater* 14, 384–388 (2015)
- [5] Chojnacka K., Kras, A., & Kamiński, T. (2022). Sound transmission loss calculation for metamaterial plate using combined analytical and numerical approach. *Vibrations in Physical Systems*
- [6] G. Liao, C. Luan, Z. Wang, J. Liu, X. Yao, J. Fu, Acoustic Metamaterials: A Review of Theories, Structures, Fabrication Approaches, and Applications. *Adv. Mater. Technol.* 2021
- [7] Aberkane-Gauthier, N., Romero-García, V., Lecoq, D., Molerón, M., Lagarrigue, C., & Pézerat, C. (2024). Soft solid subwavelength plates with periodic inclusions: Effects on acoustic Transmission Loss. *Journal of Sound and Vibration*
- [8] Brunet, T., Leng, J., & Mondain-Monval, O. (2013). Soft acoustic metamaterials. *Science*
- [9] Stanowisko do badania parametrów akustycznych małogabarytowych próbek zwłaszcza izolacyjności akustycznej — [Workstand for testing acoustic parameters of small-sized samples, preferably the acoustic insulation properties] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; wynalazca: Tadeusz KAMISIŃSKI, Tomasz Czubak. — Int.Cl.: G01N 29/11(2006.01). — Polska. — Opis patentowy; PL219788B1; Udziel. 2014-11-05; Opubl. 2015-07-31. — Zgłosz. nr P.393868 z dn. 2011-02-07
- [10] Aberkane-Gauthier, N. (2023). *Métamatériaux pour l'isolation vibroacoustique* (Doctoral dissertation, Le Mans Université)

NAGRANIA BINAURALNE JAKO POMOC W ROZWOJU ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ

BINAURAL RECORDING AS AN AID IN THE DEVELOPMENT OF SPATIAL ORIENTATION

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

klaudia.piatek.business@gmail.com

Streszczenie

Celem projektu jest stworzenie narzędzia wspierającego rozwój orientacji przestrzennej u dzieci z niepełnosprawnościami wzrokowymi poprzez bodźce słuchowe oraz zmniejszenie lęku przed wychodzeniem z domu. Metoda treningu opiera się na słuchowiskach, które uczą zaimków przestrzennych i orientacji w przestrzeni. Zaprojektowana forma i struktura słuchowisk umożliwia naukę zarówno z mentorem, jak i samodzielnie. W ramach ćwiczeń wykorzystano nagrania binauralne, które wiernie odzwierciedlają przestrzeń dźwiękową. Stworzone słuchowiska oraz ich analizy są udostępniane na platformie YouTube w postaci filmów oraz formularzy umożliwiających przesyłanie odpowiedzi przez słuchaczy. Analiza tych odpowiedzi pozwala ocenić odbiór słuchowisk i percepcję dźwięków w nich zawartych. Wstępne badania wykazują, że nagrania binauralne mogą wspierać słuchacza w rozwijaniu orientacji przestrzennej. Dodatkowo potwierdzają informację z literatury o rehabilitacji nagraniami binauralnymi. Projekt jest rozwijany o mapę dźwiękową miejsc w Polsce, która będzie zawierać nagrania statyczne konkretnych miejsc oraz nagrania spacerów poszczególnymi ulicami, z dokładnym opisem co zawiera się w nagraniu. Pozwoli to na cyfrowe poznanie świata zewnętrznego z perspektywy słuchu.

1. Wprowadzenie

Wyróżniamy pięć podstawowych zmysłów, którymi są: wzrok, słuch, smak, węch oraz zmysł kinetyczny. Według badań opisanych w książce „See What I’m Saying: The Extraordinary Powers of Our Five Senses” każdy z nich przetwarza inną ilość informacji w tym samym czasie [1].

Tabela 1. Procentowy rozkład ilości informacji przetwarzanych przez zmysły

Zmysł	Procentowa ilość przetwarzanych informacji
wzrok	83%
słuch	11%
zapach	3.5%
dotyk	1.5%
smak	1%

Można stwierdzić, że wzrok dostarcza najwięcej informacji podczas codziennego życia (tab. 1). Jednak osoby z dysfunkcją wzroku lub brakiem tego zmysłu muszą polegać na wszystkich innych zmysłach. Do oceny bliskiej przestrzeni wystarczą dotyk i węch, jednak w rozpoznaniu zjawisk na dalszych odległościach niezbędny jest odbiór i analiza dźwięków.

Zmysł słuchu pozwala na odbiór różnego rodzaju dźwięków, a percepcja słuchowa na ich analizę i interpretację. Jest ona możliwa dzięki wiedzy, pamięci i doświadczeniu, które posiada człowiek [2]. W sytuacji, gdy osoba idąca ulicą usłyszy ostrzeżenie tramwaju, który zbliża się w jej stronę, ale nie będzie mogła go zinterpretować jako zagrożenie, to odbiór tego dźwięku nie pomoże jej wybrać odpowiedniej reakcji, jaką powinna być ucieczka z niebezpiecznego miejsca. Dlatego w trakcie rozwoju dzieci niewidomych ważne jest, aby uczyć ich rozpoznawania jak największej ilości zjawisk poprzez zmysł słuchu.

W odpowiedzi na zapotrzebowanie na materiały ćwiczeniowe w jednym z etapów tego projektu opracowano dwa rodzaje słuchowisk, które są systematycznie rozwijane. Równocześnie powstaje mapa dźwiękowa, stanowiąca główny przedmiot niniejszego artykułu. Integracja dźwięku z mapami pozwoliłaby na nadanie im kolejnego wymiaru. Tworzenie binauralnych nagrań krajobrazów dźwiękowych umożliwia budowę mapy dźwiękowej oraz potencjalnej bazy dla kolejnych słuchowisk wspomagających trening rozpoznawania przestrzeni na podstawie analizy sygnałów dźwiękowych.

2. Nagrania binauralne

Dotychczas powstało wiele map dźwiękowych, których celem jest dokumentacja i eksploracja pejzaży dźwiękowych różnych miejsc na świecie. Jednym z takich projektów jest Ambisonic Map (Ambisoniczna Mapa Trójmiasta) – interaktywna mapa oparta

na ambisonicznych nagraniach umożliwiającą użytkownikowi eksplorację przestrzennych zapisów dźwiękowych z wykorzystaniem słuchawek lub systemów kanałowych. Na stronie jest pokazana mapa z zaznaczonymi punktami, gdzie dokonano rejestracji pejzaży, w opisie znajdują się linki prowadzące do filmów na platformie You Tube [3]. Innym ciekawym projektem jest Radio Aporee Maps – otwarta platforma oparta na różnych nagraniach wysokiej jakości, w której użytkownicy z całego świata mogą dzielić się rejestracjami pejzaży dźwiękowych przypisanymi do konkretnych lokalizacji geograficznych [4]. W przeciwieństwie do powyższych inicjatyw, opracowywana w ramach niniejszego projektu mapa dźwiękowa oparta jest na nagraniach binauralnych tworzonych z myślą o realistycznym odwzorowaniu przestrzeni akustycznej tak jak jest ona odbierana przez ludzkie ucho.

Wspomniany krajobraz dźwiękowy to wszystkie dźwięki otoczenia występujące w danym miejscu w określonym czasie. Źródła tych dźwięków mogą być zarówno naturalne, jak i generowane przez człowieka.

Nagrania binauralne powstają dzięki specjalnej technice nagrywania. Wykorzystuje ona dwa mikrofony jak w technikach stereofonicznych, jednakże pozwala słuchaczowi na precyzyjną lokalizację w przestrzeni zarejestrowanych sygnałów akustycznych i tym samym stwarza iluzję przebywania w miejscu, w którym dokonano nagrania. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu tak zwanej „sztucznej głowy” lub mikrofonów dousznych. Umieszczenie mikrofonów pojemnościowych na wejściu do kanału słuchowego sprawia, że rejestrują dźwięk tak, jak dociera do uszu słuchacza [5].

Jest to możliwe poprzez stosowanie przez mózg człowieka kilku mechanizmów. Podstawowe z nich to międzyuszną różnica czasu (ang. ITD — Interaural Time Difference) i poziomów (ang. ILD — Interaural Level Difference). Różnica czasu jest spowodowana różną odległością, którą musi pokonać dźwięk do lewego i prawego ucha. Natomiast różnica poziomów, wynika z cienia akustycznego, który tworzy głowa człowieka. W jego wyniku do obu uszu dotrze dźwięk o różnym natężeniu. Należy zwrócić uwagę na fakt, że każda osoba ma różną wielkość głowy, kształt uszu i inne anatomiczne szczegóły, które ją wyróżniają. Ze względu na te różnice do określenia, w jaki sposób obecność danej głowy wpływa na falę akustyczną, służy funkcja przejścia głowy (ang. HRTF — Head-Related Transfer Function) [6].

Nagrania do mapy dźwiękowej zostały wykonane za pomocą mikrofonów dousznych Soundman OKM II oraz rejestratora Zoom H6 ze względu na wygodę i mobilność. Małe rozmiary sprzętu nagraniowego pozwalają go zabrać na dowolną podróż, jak i przechowywać

przy sobie podczas codziennych obowiązków i tworzyć bazę nagrań w każdym miejscu, które na to pozwala. To ułatwia i przyspiesza pracę nad projektem, a co za tym idzie jego rozwój.

W dokumencie „Standard nauczania orientacji przestrzennej i mobilności”, opracowanym pod kierownictwem Państwowego Funduszu Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych w Warszawie, określono zalecenia dotyczące nauczania wykorzystywania zmysłów w orientacji przestrzennej oraz samodzielnym poruszaniu się przez osoby niewidome i słabowidzące. W rozdziale poświęconym wykorzystaniu percepcji słuchowej i echolokacji w procesach poznawczych wskazano, że nagrania binauralne dźwięków otoczenia mogą stanowić wartościową pomoc dydaktyczną [7]. Tym samym, założenie wykorzystania nagrań binauralnych do tworzenia słuchowisk wpisuje się w standardy nauczania osób z dysfunkcjami wzroku.

Przykładem wykorzystania nagrań binauralnych w rehabilitacji osób niewidomych i słabowidzących jest projekt na platformie Paths to Literacy – różne ćwiczenia mające na celu rozwijanie umiejętności słuchowych u dzieci z dysfunkcjami wzroku. Koncentrują się na doskonaleniu percepcji dźwiękowej i orientacji przestrzennej [8].

3. Słuchowiska do treningu percepcji słuchowej

Stworzone słuchowiska do treningu percepcji słuchowej to materiały ćwiczeniowe, które pozwalają na trening słuchu w odniesieniu do orientacji przestrzennej i działają analogicznie do treningu słuchu muzycznego. Dla iluzji przebywania w danej przestrzeni zawierają w sobie nagrania binauralne. Uczeń ma za zadanie ocenić krajobraz dźwiękowy, spróbować go nazwać, a następnie wychwycić źródła dźwięku w nim zawarte i je odpowiednio opisać. Ćwiczenia są zbudowane w formie formularzy, co umożliwia zbieranie danych do ich analizy.

Tabela 2. Słuchowisko nr 1 - „Morze”. Odpowiedzi na pytanie „Gdzie się znajdujesz?”

Ilość osób	Procentowy udział w całości	Odpowiedź
54	76.05%	Nad morzem
11	15.49%	Na plaży
3	4.23%	Na łódce/statku
1	1.41%	Ulewa w mieście
1	1.41%	Na zewnątrz
1	1.41%	Na drodze
71	100%	~ 6 odpowiedzi

Tabela 3. Słuchowisko nr 2 - „Rynek w Krakowie”. Odpowiedzi na pytanie „Gdzie się znajdujesz?”

Ilość osób	Procentowy udział w całości	Odpowiedź
7	50%	Rynek Główny w Krakowie
2	14.29%	Rynek Główny w Krakowie obok wieży Kościoła Mariackiego
2	14.29%	Rynek miasta
1	7.14%	W ruchliwym miejscu
1	7.14%	Miasto
1	7.14%	W zatłoczonym mieście
14	100%	~ 6 odpowiedzi

W tabelach 2 i 3 przedstawiono, jak osoby badane postrzegają zarejestrowaną przestrzeń. Słuchacze mieli za zadanie opisać ją własnymi słowami, nie wiedząc wcześniej, co usłyszą w nagraniu. Podobne odpowiedzi zostały ujednolicone na potrzeby analizy danych (odpowiedzi są zbierane poprzez pytania otwarte, aby nie blokować uczestników badania, ani nie poddawać im sugestii, gdzie się znajdują). Można zaobserwować, że morze zostało poprawnie rozpoznane przez 91.54% badanych (odpowiedzi: „nad morzem”, „na plaży”), a Rynek w Krakowie przez 78,58% (odpowiedzi: „Rynek Główny w Krakowie”, „Rynek Główny w Krakowie obok wieży Kościoła Mariackiego” oraz „Rynek miasta”). Grupa

badanych była z przedziału 7-56 lat. Są to bardzo charakterystyczne punkty i tak zostały ocenione względem poprawności odpowiedzi, można zatem potwierdzić, że nagrania binauralne spełniają swoją funkcję w dobrej reprezentacji krajobrazów dźwiękowych.

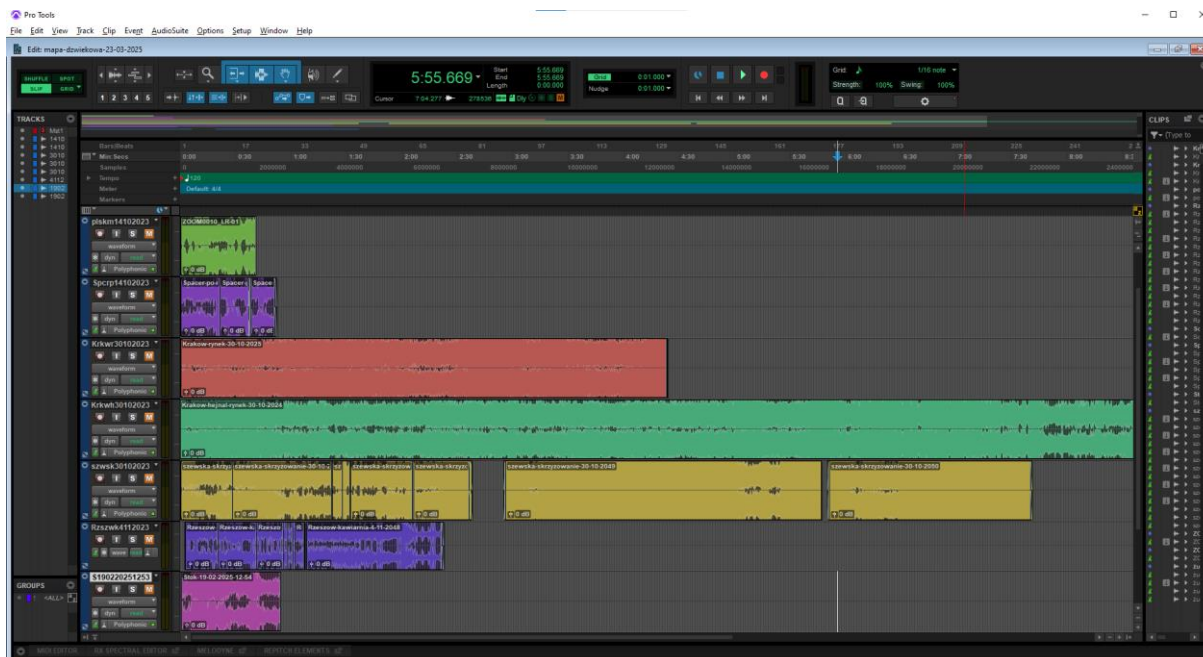
4. Mapa dźwiękowa

Pojawia się pytanie, po co osoba niewidoma ma podróżować, skoro i tak nie widzi. Odpowiada na nie Marcin Ryszka w swojej autobiografii „Nie widzę przeszkód”. W rozdziale o podróżowaniu opowiada, jak razem z kolegami (jednym również niewidomym, a drugim kulawym) weszli na mur chiński. Choć nie mógł zobaczyć architektury mostu, to zachwycił się odczuwalną wielkością budowli [9]. Każda przestrzeń wygląda, ale również i brzmi inaczej.

Mapa dźwiękowa to zebrane nagrania krajobrazów dźwiękowych różnych miejsc na świecie. Można powiedzieć, że prawie każdy człowiek używa map. Pomagają w przemieszczaniu się, wskazują drogę, ale również służą do wyszukiwania ciekawych miejsc do podróżowania, jak i podstawowych lokalizacji związanych z wszelkiego rodzaju sklepami i lokalami. Mamy tam dane lokalizacyjne, opisy, opinie, zdjęcia. W poszukiwaniu ciekawych miejsc często skupiamy się na ich aspekcie wizualnym. A co, jeśli nie możemy ich zobaczyć? Dodanie dźwięku do map lub stworzenie bazy dźwięków różnych miejsc pozwoli na kolejny wymiar poznawania danego miejsca w przestrzeni cyfrowej. Dźwięk otoczenia, tak jak jego wygląd może wpływać na emocje, nie mając możliwości sprawdzenia obrazu, nagranie audio może pomóc w wyborze miejsca na obiad lub rozrywkę. Dodatkowo jest to pewnego rodzaju możliwość zwiedzania świata dla osób, których nie stać na dalekie podróże. Nawiązując do Rynku w Krakowie, zdjęcia są piękne, ale nie oddadzą w pełni tego miejsca. W połączeniu z dźwiękiem przestrzennym dostajemy pełniejsze doświadczenie poznania danej lokalizacji.

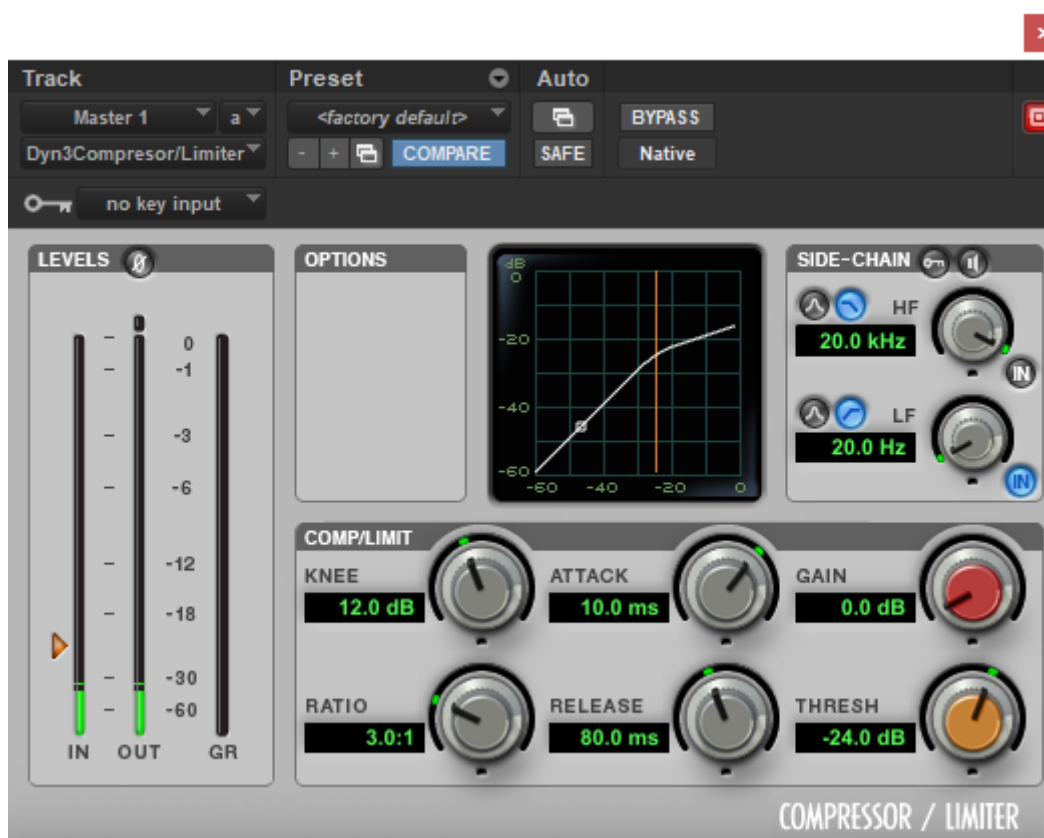
4.1. Proces przygotowania

Kolejne miejsca są nagrywane mikrofonami dousznymi Soundman OKM II. Podczas edycji w programie Pro Tools (rys. 1.) wybierane są fragmenty, które nie zawierają niepożądanych danych, takich jak prywatne rozmowy osób znajdujących się w danej przestrzeni. Nie zawsze jest możliwe wykonanie nagrania bez udziału osób trzecich.



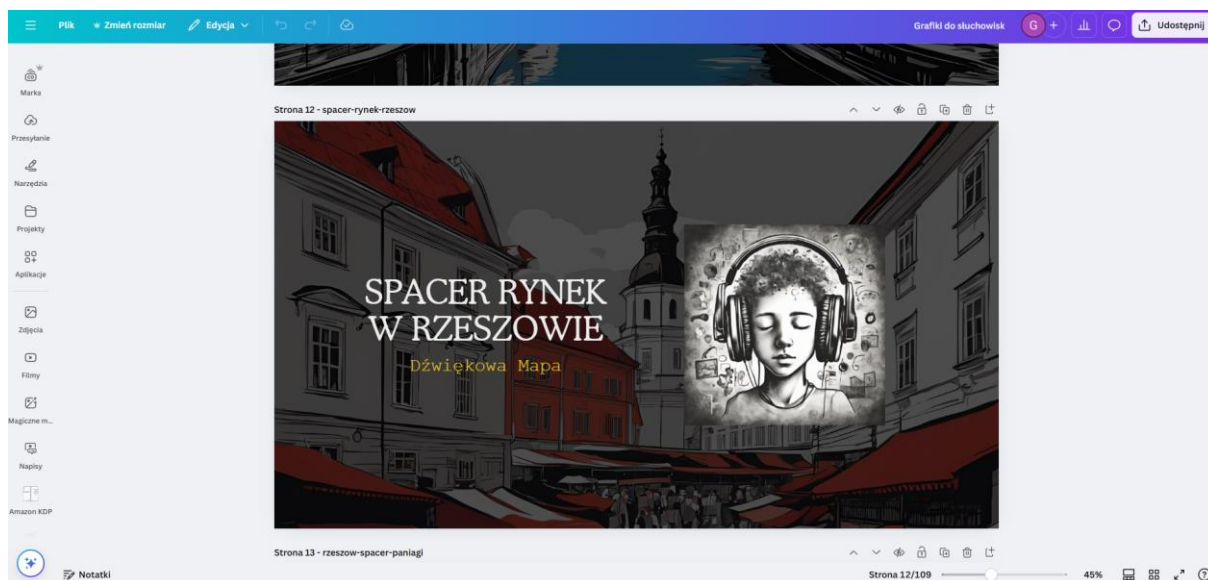
Rysunek 1. Widok okna edycyjnego programu Pro Tools

Materiał dźwiękowy został poddany kompresji przy użyciu wtyczki Dyn3Compressor (rys. 2.). Wartości parametrów kompresji: Knee 12.0 dB, Attack 10.0 ms, Gain 0.0 dB, Ratio 3.0:1, Release 80.0 ms, Threshold -24.0 dB.



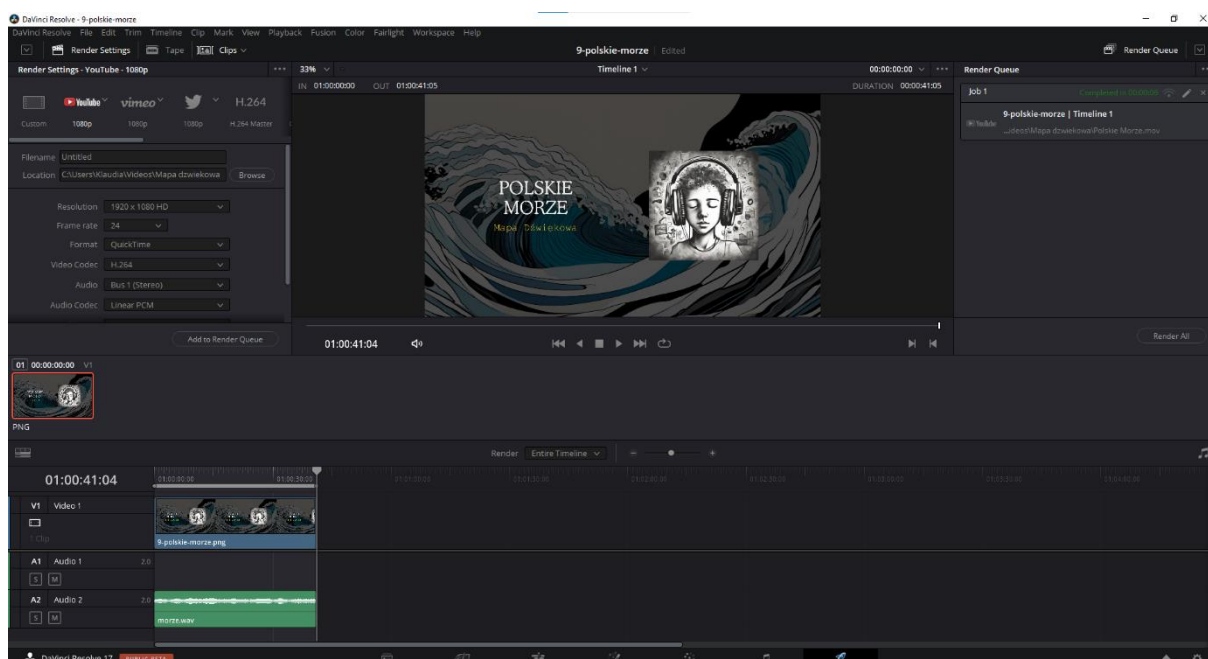
Rysunek 2. Wtyczka Dyn3Compressor

Ze względu na umieszczanie materiałów na platformie YouTube konieczne jest przygotowanie filmów. Grafiki, które są statycznym tłem dla każdego nagrania, generowane za pomocą sztucznej inteligencji w programie Canva (rys. 3.). Zastosowano schemat projektowania, to znaczy: grafika wektorowa z maksymalnie trzema kolorami (biel, czern oraz jeden inny) przedstawiająca miejsce na wzór oryginalnej przestrzeni.



Rysunek 3. Widok okna edycyjnego programu Canva

Filmy są montowane w programie DaVinci Resolve (rys. 4.). Eksportowane w rozdzielczości HD: 1920 x 1080 pikseli, Audio Codec: Linear PCM.



Rysunek 4. Widok okna edycyjnego programu DaVinci Resolve

W opisie do każdego nagrania znajdują się: data, godzina, nazwa miejsca. Są to ważne dane charakterystyczne wartości znakowania, ze względu na zmieniające się brzmienie krajobrazów dźwiękowych w zależności od pory dnia, roku. Dodatkowo umieszczono spis charakterystycznych źródeł dźwięku dla danej przestrzeni.

4.2. Aktualny etap projektu

Podczas tworzenia mapy ważne jest zachowanie różnorodności dźwięków w niej zawartych. Powinny się w niej znaleźć środowiska naturalne, miejsca zurbanizowane, lokale gastronomiczne, sklepy, charakterystyczne punkty na trasie do wyznaczonego celu.

Opublikowane miejsca mapy dźwiękowej:

1. Rzeszów, spacer wzdłuż Wisłoka,
2. Rzeszów, spacer po Rynku,
3. Rzeszów, spacer ul. 3 Maja,
4. Kraków, spacer ul. Szpitalną,
5. Kraków, Sukiennice,
6. Kraków, przejście między Rynkami,
7. Kraków, Rynek, okolice Kościoła Mariackiego (zima),
8. Kraków, Mały Rynek,
9. Polskie Morze,
10. Molo w Brzeźnie, okolice Gdańska,
11. Rynek w Krakowie (w lecie),
12. Kraków, spacer ulicą Szewską,
13. Kraków, skrzyżowanie ulic Szewskiej, Juliana Dunajewskiego, Podwale i Karmelickiej,
14. Rzeszów, Kawiarnia Dziarski Barista obok Rynku,
15. Gromadzyń stok narciarski orczykowy,
16. Stuposiany, Muczne, Zagroda Pokazowa Żubrów,
17. Solina, Zapora.

4.3. Dostępność

Na czas lutego 2025 roku, mapa dźwiękowa jest dostępna jako filmy na platformie YouTube. Na najbliższy rozwój projektu planowana jest lista z pinezkami na mapie Google lub komentarze w już oznaczonych miejscach. W obu przypadkach zostaną umieszczone linki do nagrań.

Przy zgromadzonej dużej bazie nagrań dobrym pomysłem może być stworzenie nowego systemu map z opcją do odsłuchania dźwięków bezpośrednio z aplikacji. Jeśli byłoby to możliwe można też spróbować porozumieć się z firmami takimi jak Google lub Apple.

5. Podsumowanie

Udało się zarejestrować oraz udostępnić nagrania z 17 różnych miejsc. Niektóre z punktów można rozbić na mniejsze obiekty, zwiększając w ten sposób ilość udźwiękowionych miejsc. Projekt ma potencjał rozwojowy, może w przyszłości być uzupełnieniem już istniejących map geograficznych. Wymaga wiele pracy, która skutkuje wielką bazą danych dźwiękowych. Dla indywidualnych użytkowników może być elementem przełamującym lęk przed pójściem do danego miejsca lub być okazją do cyfrowej eksploracji odległych przestrzeni.

Aby mapa dźwiękowa była użyteczna dla osób niewidomych w życiu codziennym, konieczne jest stworzenie systemu, gdzie można wyszukać dane miejsca poprzez polecenie głosowe. Najlepszym rozwiązaniem byłaby budowa osobnej przestrzeni cyfrowej do obsługi i zorganizowania nagrań.

Planowany kolejny etap projektu to sukcesywne zwiększanie bazy dźwięków oraz marketing. Nagrania mogą dodatkowo zostać wykorzystane w kolejnych materiałach ćwiczeniowych w słuchowiskach do treningu percepcji słuchowej i rozpoznawania krajobrazów.

Literatura

- [1] Rosenblum L. D., *See What I'm Saying: The Extraordinary Powers of Our Five Senses*, WW Norton & Company, 2010.
- [2] Irena Polewczyk, *Percepcja słuchowa – przedmiot badań i narzędzia diagnozy*. W: Węsierska K., Moćko N.: *Profilaktyka logopedyczna w praktyce edukacyjnej* (Tom 2), Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2013.
- [3] Ambisoniczna Mapa Trójmiasta, [<https://multimed.org/ambisonicmap/>] [dostęp: 04.04.2025].
- [4] Radio Aporee Maps, [<https://aporee.org/maps/>] [dostęp: 04.04.2025].
- [5] Brixen E. B., *Binaural Recording Techniques*, [<https://www.dpamicrophones.com/mic-university/audio-production/binaural-recording-techniques/>] [dostęp: 10.02.2025].
- [6] *Słyszemy, gdzie to jest? Lokalizacja źródeł dźwięku*, [<https://nyquista.pl/slyszymy-gdzie-to-jest-lokalizacja-zrodel-dzwieku/>] [dostęp: 04.01.2024].
- [7] *Standard nauczania orientacji przestrzennej i mobilności*, 2022. [<https://firr.org.pl/wp-content/uploads/2022/04/STANDARD-NAUCZANIA-ORIENTACJI-PRZESTRZENNEJ-I-MOBILNOSCI.pdf>] [dostęp: 05.01.2024].
- [8] LEAP – Games Using Binaural Sound, [https://www.pathstoliteracy.org/resource/leap-games-using-binaural-sound/?utm_source=chatgpt.com] [dostęp: 04.04.2025].
- [9] Marcin Ryszka, Jakub Białek, *Nie widzę przeszkód*, Sine Qua Non, 2021.

Załącznik

1. Link do kanału na You Tube z materiałami dźwiękowymi:
[<https://www.youtube.com/@MyFriendSound>].

Jakub Tokarski¹, Paweł Skowron¹, Paweł Baran¹, Kamil Zych¹

Pomiar indywidualnych funkcji HRTF w warunkach bezpogłosowych.

Measurement of individual HRTF functions in an anechoic environment.

¹ Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska

jakub.tokarski99@gmail.com

Streszczenie

Rosnąca popularność multimediiów sprawia, że coraz ważniejsze staje się zwiększenie immersji słuchacza w wirtualnych scenach dźwiękowych. Aby uzyskać wrażenie przestrzenności i naturalności dźwięku w odsłuchu słuchawkowym, wykorzystuje się zestaw funkcji przenoszenia głowy HRTF (ang. Head-Related Transfer Function). Wzrost immersji można osiągnąć dzięki personalizacji tej funkcji, czyli indywidualnemu dopasowaniu do cech anatomicznych użytkownika. Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie serii pomiarów indywidualnych funkcji HRTF dla kilku osób, weryfikacja dokładności zebranych danych oraz analiza możliwości usprawnienia i optymalizacji samego procesu pomiarowego. Badania zrealizowano w komorze bezchowej, używając odpowiednio przystosowanego sprzętu. Dźwięk emitowało dziesięć głośników rozmieszczonych co 15 stopni kąta elewacji (w zakresie od -45° do 90°). Osoba badana siedziała na obrotowym stoliku, w kanałach słuchowych mając umieszczone mikrofony. Sygnały dźwiękowe były generowane oraz rejestrowane poprzez system pomiarowy Pulse. W efekcie uzyskano sześć zestawów funkcji HRTF.

1 Wstęp

Funkcje HRTF (*Head-Related Transfer Function*) są zestawem funkcji transmitancji, opisujących wpływ struktur anatomicznych, takich jak małżowina uszna, na widmo częstotliwościowe sygnału akustycznego, zanim dotrze do błony bębenkowej. Odpowiadający jej zbiór odpowiedzi impulsowych to HRIR (*Head-Related Impulse Response*). HRTF pełni kluczową rolę w procesie percepcji kierunkowości dźwięku oraz jego eksternalizacji:

$$H_L = H_L(r, \theta, \varphi, f, a) = \frac{P_L(r, \theta, \varphi, f, a)}{P_0(r, f)} \quad (1)$$

$$H_P = H_P(r, \theta, \varphi, f, a) = \frac{P_P(r, \theta, \varphi, f, a)}{P_0(r, f)} \quad (2)$$

gdzie:[1]

H_L, H_P - HRTF, L-lewe ucho, P-prawe ucho [-]

P_L, P_P - ciśnienie akustyczne, L-lewe ucho, P-prawe ucho [Pa]

P_0 - ciśnienie akustyczne źródła zarejestrowane w miejscu środka głowy badanej osoby, lecz bez jej obecności [Pa]

(r, θ, φ) - współrzędne źródła w przestrzeni, względem położenia środka głowy

a - parametr określający indywidualne cechy anatomiczne

W systemach opartych na słuchawkach filtrowanie sygnału dźwiękowego z użyciem HRTF pozwala na symulację realistycznej przestrzeni akustycznej, zastępując fizyczne źródła dźwięku ich wirtualnymi odpowiednikami. Pomiar funkcji realizuje się najczęściej w warunkach bezechowych, rejestrując odpowiedź impulsową za pomocą mikrofonów umieszczonych w kanale słuchowym. Zebrane charakterystyki służą następnie do generowania filtrów cyfrowych, odwzorowujących naturalne mechanizmy lokalizacji dźwięku.

1.1 Motywacja

Główną motywacją do przeprowadzenia badań była potrzeba stworzenia bazy indywidualnych funkcji HRTF[5]. Wraz z rozwojem technologii wirtualnej rzeczywistości, systemów nagłośnienia, jak i popularyzacją gier e-sportowych[8][9], rośnie zapotrzebowanie na coraz to bardziej realistyczną lokalizację źródła dźwięku. Do tej pory używano metod polegających na uśrednionych funkcjach HRTF, co może prowadzić do błędów w percepcji użytkowników o nietypowej budowie małżowiny usznej. Zebrane dane mogą w przyszłości

posłużyć jako podstawa do trenowania modeli AI[7], które mogą przewidywać HRTF na podstawie skanu 3D głowy użytkownika[10], jak również mogą pomóc przy weryfikacji hipotez dotyczących wpływu wybranych parametrów na kształt funkcji HRTF[4].

Rozbudowa bazy pomiarów HRTF jest głównie zmotywowana rozszerzeniem możliwości dydaktycznych i badawczych Zakładu Elektroakustyki, dogłębne zapoznanie się z technologią HRTF na rzecz dalszych prac dyplomowych i projektowych oraz analiza otrzymanych wyników pod kątem zakłóceń, błędów i problemów występujących w procesie pomiarowym mająca na celu uzyskanie wniosków niezbędnych do rozwoju stanowiska pomiarowego, co umożliwiłoby dokładniejsze i bardziej powtarzalne wyznaczanie funkcji HRTF.

2 Techniki HRTF

W celu wyznaczenia funkcji przenoszenia głowy stosowanych jest szereg różnych metod m.in.: bezpośredni pomiar, modelowanie akustyczne, metody numeryczne, wspomaganie obliczeń selekcji algorytmami sztucznej inteligencji, czy też dobór i dopasowanie HRTF z istniejących baz danych. Techniki są ciągle rozwijane, a jedną z najnowocześniejszych jest projekt słuchawek zintegrowanych z systemami pomiarowymi HRTF[2].

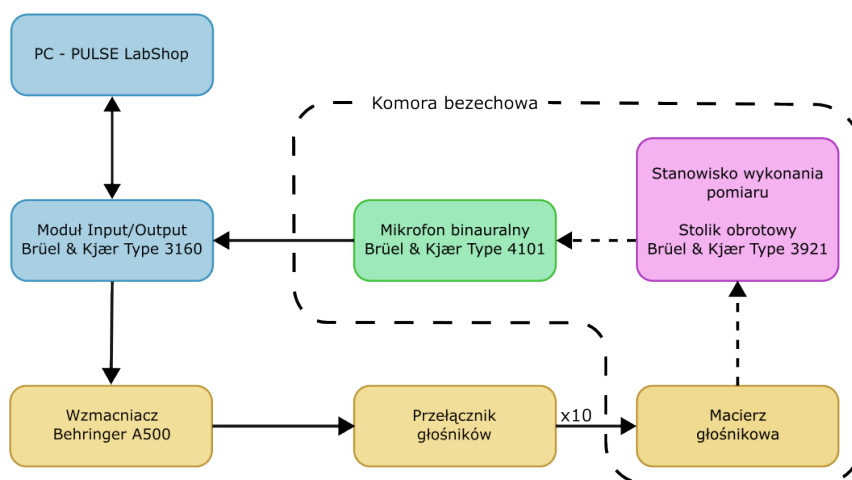
W niniejszej pracy skupiono się na pomiarze bezpośrednim. Metoda ta umożliwia zastosowanie kilku różnych konfiguracji stanowiska pomiarowego, które krótko opisano poniżej:

- Konfiguracja z obrotowym stanowiskiem – stanowisko pomiarowe złożone z nieruchomych głośników równomiernie rozmieszczonych w płaszczyźnie elewacji oraz obrotowego siedziska dla osoby badanej.
- Konfiguracja z nieruchomą macierzą głośników - macierz głośników rozmieszczonych na sferycznej ramie otaczającej słuchacza, co pozwala na pomiar odpowiedzi impulsowych dla setek kierunków bez konieczności ruchu osoby badanej[3].
- Konfiguracja z ruchomymi głośnikami – źródło dźwięku przemieszcza się wokół osoby badanej, zapewniając ciągłą zmianę kąta emisji, zapewniając tym samym wysoką rozdzielczość kątową.

Pomiary opisane w tej pracy zostały zrealizowane na stanowisku pomiarowym, wykorzystującym konfigurację opartą o nieruchome głośniki równomiernie rozmieszczone w płaszczyźnie elewacji oraz stół obrotowy, które zostało dokładniej opisane w kolejnym rozdziale.

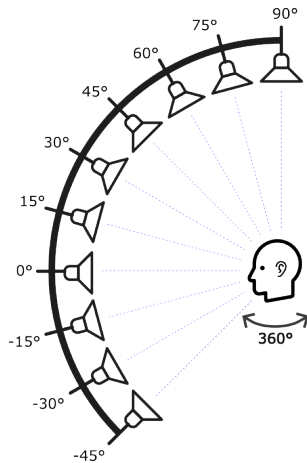
3 Stanowisko pomiarowe

Pomiary przeprowadzono w komorze bezdechowej Zakładu Elektroakustyki (ZEA) Instytutu Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej. Stanowisko oparto na systemie PULSE firmy Brüel & Kjær, którego głównym elementem był dwuczęściowy moduł Input/Output Brüel & Kjær Type 3160-A-042 składający się z generatora i karty akwizycji danych, sterowany protokołem Ethernet. Do generatora podłączono binauralne mikrofony pomiarowe Type 4101.

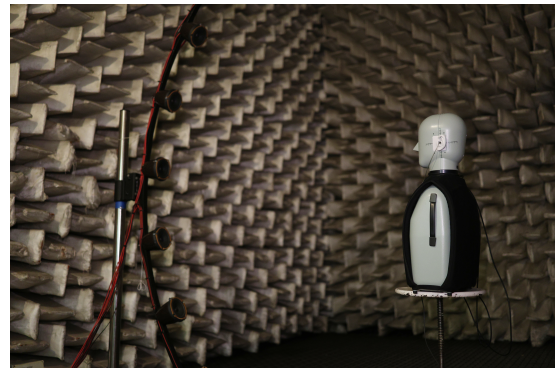


Rysunek 1: Schemat blokowy układu pomiarowego

Osoby badane, po założeniu mikrofonów do kanałów słuchowych, zajmowały pozycję na obrotowym stoliku (Brüel & Kjær 3921), umożliwiającym precyzyjną zmianę azymutu. Sygnał MLS (*Minimal Length Sequence*) z generatora kierowano do wzmacniacza referencyjnego Behringer A500, a następnie do dziesięciokanałowego przełącznika głośników. Głośniki, jakich użyto to Tonsil GD 12/8/2, zakres częstotliwości jaką badano sygnał to 25 kHz, natomiast częstotliwość probkowania wynosiła 65536 Hz. Schemat blokowy opisujący połączenia komponentów znajduje się na rysunku 1. Każde wyjście przełącznika zasilало pojedynczy głośnik w łukowej macierzy głośnikowej, w której źródła dźwięku były rozmieszczone co 15° w zakresie od -45° do 90° kąta elewacji. Pozycję macierzy regulowano tak, aby płaszczyzna uszu badanego pokrywała się z wysokością głośnika odpowiadającego elewacji 0° (poziom referencyjny), a środek głowy osoby badanej znajdował się w osi głośnika odpowiadającego elewacji 90° . Powyższy opis ilustruje schemat na rysunku 2.



Rysunek 2: Położenie głowy osoby badanej w trakcie pomiaru



Rysunek 3: Pomiar HATS

4 Pomiary

Przed rozpoczęciem procedury pomiarowej konieczne jest przeprowadzenie instruktażu uczestnika, obejmującego omówienie warunków badania oraz potencjalnych odczuć towarzyszących jego realizacji. Należy poinformować uczestnika o możliwości wystąpienia dyskomfortu zarówno w związku z samym procesem pomiarowym, jak i koniecznością przebywania w komorze bezechowej. Następnie należy zadbać by osoba badana miała umieszczone zatyczki w kanałach słuchowych, które pełniły funkcję ochrony słuchu, zmniejszając odczuwane przez osobę badaną natężenie szumu MLS oraz służyły eliminacji rezonansów powstałych w kanale słuchowym. Przed przystąpieniem do procedury pomiarowej wykonywany jest pomiar testowy w celach sprawdzenia, czy wszystkie urządzenia zostały poprawnie skalibrowane. Pomiar wykonywany jest dla HATS TYPE 4100(Head and Torso Simulator), przedstawionego na rysunku 3.

4.1 Procedura pomiarowa

1. Aktywacja źródła dźwięku - dla pojedynczego głośnika w matrycy odtwarzano sygnał MLS
2. Faza statyczna - pierwsze 2 sekundy pomiaru rejestrowane są przy nieruchomej pozycji osoby badanej i przy kącie azymutu równego 0°
3. Faza dynamiczna - po zakończeniu fazy statycznej uruchomiono obrót stolika z prędkością $5^\circ/\text{s}$, rejestrując odpowiedź impulsową w pełnym zakresie 360° azymutu.
4. Zakończenie pojedynczego cyklu - po każdym pełnym obrocie należało wyłączyć sy-

- gnał MLS, zatrzymać stolik obrotowy oraz skorygować jego pozycję tak by osoba, dla której wykonywany jest pomiar była skierowana na kąt 0° w płaszczyźnie azymutu.
5. Powtarzanie cyklu - powyższe kroki należy powtórzyć dla każdego głośnika w macierzy głośnikowej poprzez ustawienie przełącznika pomiędzy kolejnymi cyklami.

Kompletny pomiar dla jednej osoby, obejmujący 10 elewacji, zajmował około 30 minut przy zaangażowaniu trzysobowego zespołu. W celu usprawnienia procesu, w Zakładzie Elektroakustyki prowadzone są prace nad automatyzacją układu w ramach projektów dyplomowych, m.in. poprzez integrację silników krokowych do kontroli obrotu stolika jak również automatyzację pomiarów poprzez interfejs sterujący, oraz zastosowanie kodów ortogonalnych do odtwarzania odpowiedzi impulsowej z użyciem wielu źródeł dźwięku.

4.2 Akwizycja danych

Zarejestrowany za pomocą mikrofonu binauralnego sygnał MLS był przetwarzany przez moduł wejściowy systemu, a następnie przesyłany do komputera, na którym uruchomione było oprogramowanie PULSE LabShop. Oprogramowanie to umożliwiało sterowanie modulem Input/Output Brüel Kjaer Type 3160 oraz zapis wyników pomiarowych.

Podczas realizacji pomiarów dla każdej badanej osoby tworzono dedykowany plik pomiarowy, oparty na szablonie zawierającym zdefiniowane parametry kanałów pomiarowych oraz generowanego sygnału MLS. Następnie rejestrowano oddzielne pomiary dla kolejnych kątów elewacji. Po zakończeniu rejestracji dla wszystkich kątów dane były eksportowane w celu ich dalszej analizy.

5 Przetwarzanie danych

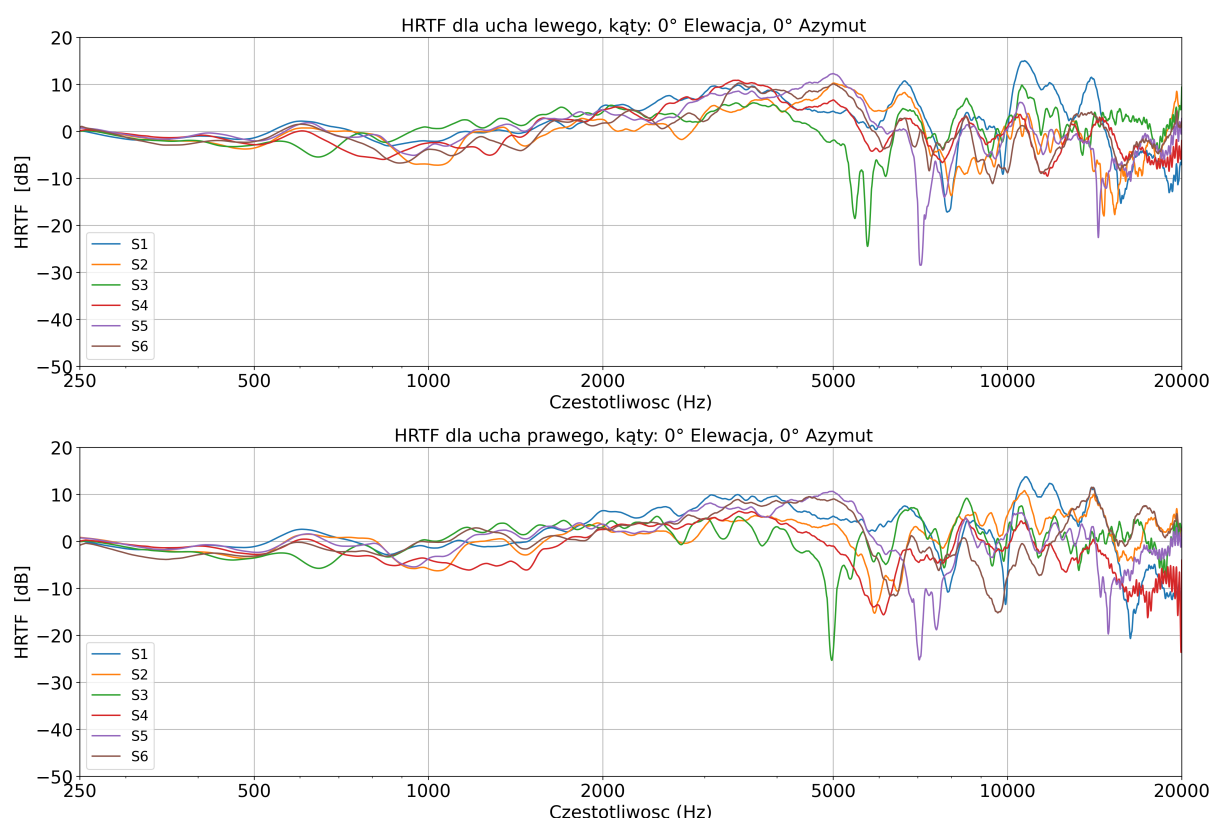
Każdy z pomiarów dla poszczególnych kątów azymutu, nie był rejestrowany w ściśle określonym punkcie, ale stanowił uśrednienie z obszaru o zakresie $\pm 5^\circ$ względem nominalnego kąta. Oznacza to, że dla każdego kierunku co 10° uzyskano średnią odpowiedź z przedziału $\pm 5^\circ$. Zarejestrowany przez mikrofony w uszach sygnał MLS poddawano wieloetapowej obróbce w celu wyodrębnienia funkcji HRTF:

1. Obliczanie odpowiedzi impulsowych (HRIR), która dodatkowo jest dzielona przez charakterystykę referencyjną mikrofonów binauralnych, zmierzoną w warunkach bez obciążenia akustycznego, tym samym eliminując wpływ mikrofonów i toru elektroakustycznego.

2. Transformacja do dziedziny częstotliwości (HRTF), poprzez użycie transformaty Fouriera.

Dane HRTF zostały przekształcone do formatu SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics) poprzez mapowanie zmierzonych charakterystyk częstotliwościowych (części rzeczywiste i urojone) na odpowiednie pola w pliku SOFA, przypisując je do konkretnych kierunków źródła i kanałów usznych.

6 Wyniki



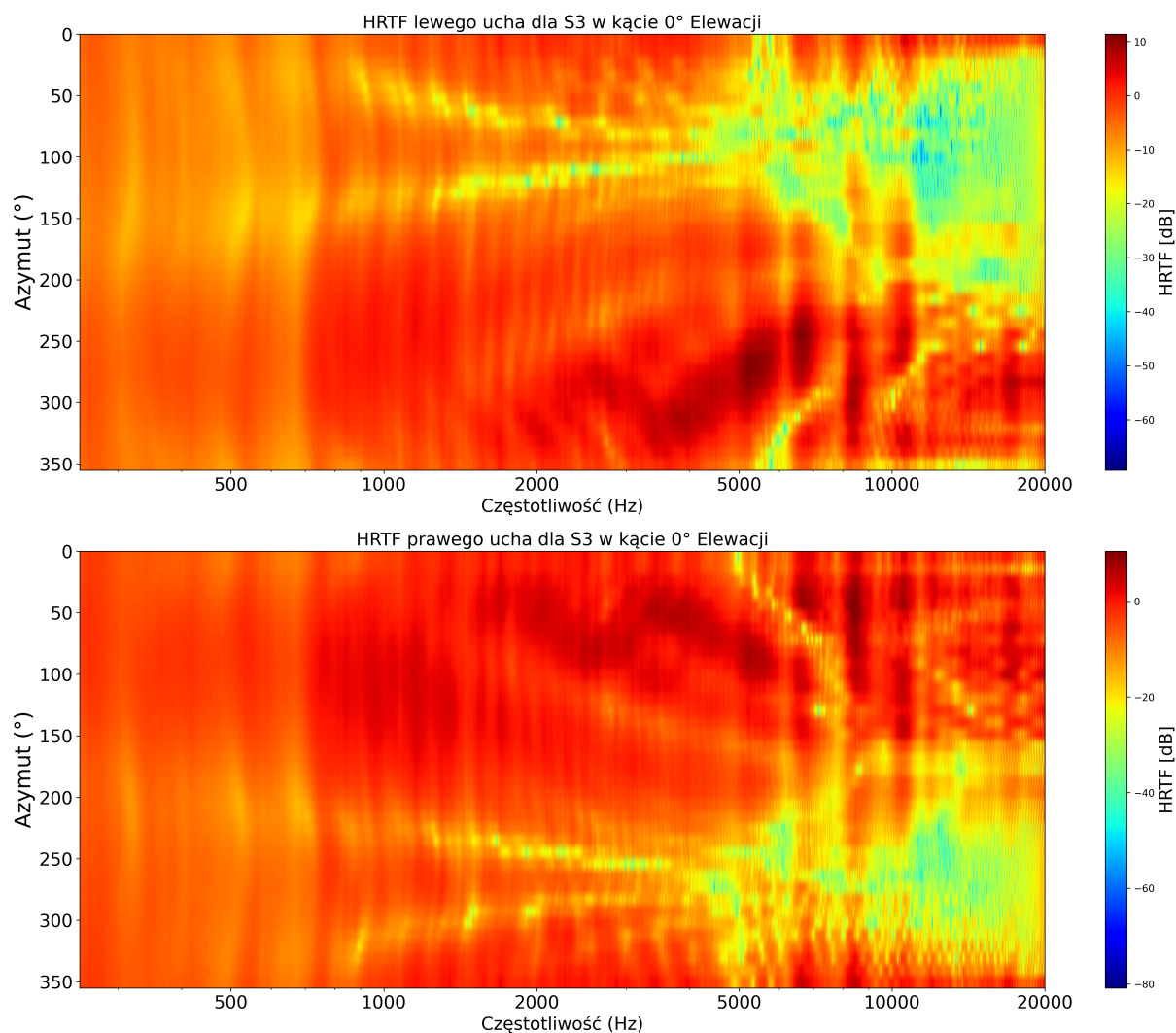
Rysunek 4: Funkcję HRTF dla 6 osób na kierunku (El: 0° , Az :0°), ucho lewe i prawe

Powyższe wykresy (rysunek 4) przedstawiają zestaw funkcji HRTF dla 6 badanych osób, zmierzonych przy kącie azymutu i elewacji równych 0°. Analizę rozpoczęto od częstotliwości 250 Hz, ponieważ dla niższych pasm, długość fali akustycznej przekracza wymiary głowy, co sprawia, że efekty związane z geometrią ciała badanej osoby są minimalne. W rezultacie fale dźwiękowe nie ulegają istotnemu filtrowaniu przez ciało, a różnice w odbiorze tych częstotliwości między osobami są niewielkie. Analizując powyższe wykresy można zaobserwować, że powyżej średnich częstotliwości zaczynają pojawiać się wyraźne różnice, wynikające z unikalnej budowy małżowiny usznej. Kształt i wielkość małżowiny wpływają

na sposób, w jaki fale dźwiękowe są odbijane i kierowane do kanału słuchowego, co skutkuje indywidualnym charakterem wzmocnienia lub tłumienia dźwięków w tym zakresie.

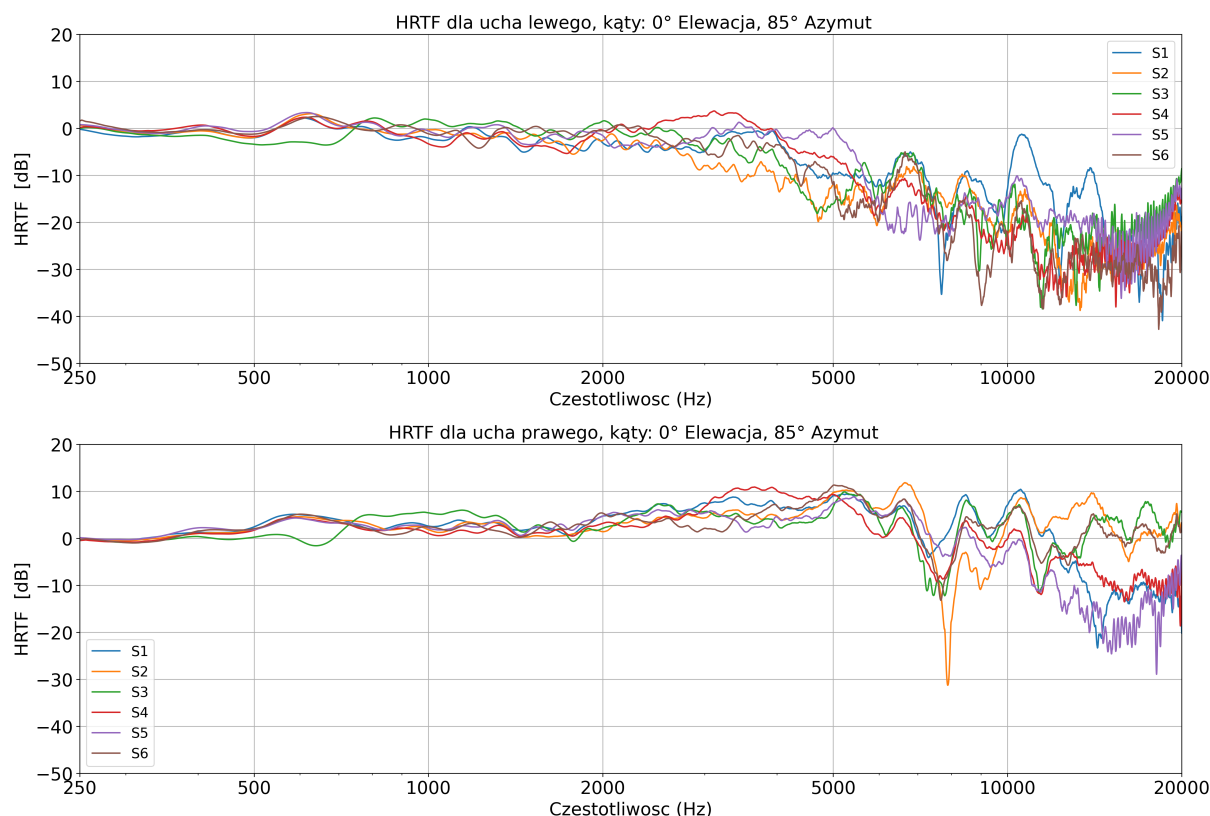
Poniżej, na rysunku 5 przedstawiono przykładową funkcję HRTF jednej z badanych osób dla całej płaszczyzny horyzontalnej i kąta elewacji równego 0° . Charakterystyki te są symetryczne względem siebie, co odpowiada symetrii uszu oraz jest szczególnie widoczne dla wysokich częstotliwości. W doskonały sposób obrazuje sposób, w jaki począwszy od częstotliwości średnich, a zwłaszcza dla wysokich częstotliwości, fale dźwiękowe ulegają tłumieniu. Ponadto umożliwia szerszy przegląd wyników i może wskazać zaburzenia pomiaru niewidoczne na wykresach dla konkretnych zestawień kątów azymutu i elewacji, takie jak widoczne na poniższym rysunku pionowe, przerywane linie dla częstotliwości 100Hz i 170Hz, mogące sugerować występowanie rezonansu.

Obserwacja ta pokrywa się z założeniami teoretycznymi propagacji dźwięku.



Rysunek 5: Funkcję HRTF w funkcji kąta azymutu, ucho lewe i prawe

W celu dokładniejszego przedstawienia zjawiska tłumienia wysokich częstotliwości przez ciała osób badanych na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów dla kąta azymutu równego 85° oraz elewacji równego 0° . Z racji na lewoskrętny kierunek obrotu, na źródło dźwięku bezpośrednio wyeksponowane jest ucho prawe. Porównując charakterystyki dla obu uszu można zaobserwować osiąganie niższych wartości magnitudy powyżej 500 Hz dla ucha lewego względem ucha prawego, ze szczególną rozbieżnością wartości powyżej 2 kHz.



Rysunek 6: Funkcję HRTF dla 6 osób na kierunku (El: 0° , Az: 85°), ucho lewe i prawe

7 Podsumowanie

Wynikiem przeprowadzonych prac jest rozszerzenie bazy HRFT o 6 nowych pomiarów oraz dogłębne zaznajomienie z wykorzystywaną technologią. Doświadczenia i materiały zebrane w trakcie realizacji niniejszej pracy stanowią zarówno motywację jak i podstawę niezbędną do rozpoczęcia nowych oraz kontynuacji prac projektowych oraz badawczych nad technologią HRTF. Zarówno pomysły oraz plany dalszego rozwoju projektu zostały dokładniej opisane w sekcji 7.2.

7.1 Błędy, problemy, rozwiązania

Pomiar zestawu funkcji HRTF jest zadaniem złożonym, w którym wiele czynników może znacząco wpłynąć na wynik końcowy. Podczas realizacji badań zidentyfikowano szereg problemów oraz sformułowano rekomendację mogące przyczynić się poprawie powtarzalności i dokładności pomiarów. Jednym z kluczowych elementów jest odpowiednie umiejscowienie mikrofonów w przewodach słuchowych badanej osoby. Ich pozycja powinna być identyczna dla obu uszu i pozostawać niezmienną przez cały czas trwania badania. Zaobserwowano, że główną przyczyną przemieszczania się mikrofonów jest ich przewo-

dowe połączenie z systemem pomiarowym, który znajduje się poza komorą bezechową. Obrót osoby badanej na stoliku obrotowym powoduje owijanie się przewodu, co wymaga regularnej korekty po każdym obrocie, niosąc przy tym ryzyko zmiany pozycji mikrofonów, jak również wydłużając czas całego badania, co wiąże się z ryzykiem zmiany pozycji badanej osoby. Eliminacja tego problemu jest możliwa poprzez zastosowanie transmisji bezprzewodowej, gdzie dane są zbierane na urządzeniu wewnątrz komory i wysyłane po jednorazowym obrocie osoby badanej do systemu pomiarowego.

Innym istotnym ograniczeniem tego badania jest konieczność zachowania stabilnej postawy osoby badanej przez dłuższy czas. Wraz z postępem badania zaobserwowano zmiany w pozycji ciała, takie jak garbienie się, przechylenie tułowia czy pochylenie głowy, co wpływa na końcowe wyniki. Skrócenie czasu trwania badania mogłoby znacząco ograniczyć ten efekt, jednak należy także rozważyć zastosowanie mechanizmów wspierających stabilizację postawy, przy czym trzeba mieć na uwadze minimalizację wpływu dodatkowych elementów stanowiska na propagację fali dźwiękowej.

7.2 Dalszy rozwój

W wyniku przeprowadzonych badań podjęto decyzję o dalszym rozwijaniu metod pozyskiwania personalnych funkcji HRTF. W związku z tym opracowano dwa podejścia, mające na celu zwiększenie dokładności oraz efektywności procesu akwizycji danych HRTF. Projekty te będą realizowane w ramach prac magisterskich we współpracy z Zakładem Elektroakustyki Instytutu Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej.

Pierwszy projekt obejmuje opracowanie kompleksowego systemu pomiarowego, obejmującego zarówno sprzętową, jak i programową część procesu akwizycji. Kluczowym elementem systemu będzie dedykowane oprogramowanie umożliwiające automatyzację pomiarów, przetwarzanie uzyskanych danych oraz eksport wyników w formacie SOFA. Rozwiązanie to ma na celu poprawę dokładności i powtarzalności pomiarów, a także optymalizację procesu poprzez redukcję błędów wynikających z manualnej obsługi oraz skrócenie całkowitego czasu przeprowadzania badań.

Drugi projekt koncentruje się na zastosowaniu kodów ortogonalnych w procesie akwizycji HRTF. Wykorzystanie kodów o wzajemnie ortogonalnych charakterystykach umożliwia jednoczesne emitowanie sygnałów testowych przez wiele źródeł dźwięku, co znacząco

przyspieszy proces rejestracji impulsowych odpowiedzi akustycznych. Metoda ta może również przyczynić się do redukcji wpływu szumów i zakłóceń, co w konsekwencji pozwoli na uzyskanie bardziej precyzyjnych i stabilnych wyników pomiarowych.

W ramach dalszych badań planowane jest przeprowadzenie szeroko zakrojonych testów walidacyjnych, mających na celu ocenę skuteczności opracowanych metod w porównaniu do innych istniejących technik pozyskiwania funkcji HRTF. Analiza porównawcza będzie obejmować zarówno aspekty dokładności uzyskiwanych wyników, jak i efektywności czasowej oraz powtarzalności pomiarów. Weryfikacja wyników zostanie przeprowadzona za pomocą testów percepcyjnych, takich jak AB, ABX oraz MUSHRA, a także w środowisku rzeczywistości wirtualnej (VR), gdzie uczestnicy badań będą mieli za zadanie określenie lokalizacji źródła dźwięku w przestrzeni. Tego rodzaju testy pozwolą na ocenę subiektywnej precyzji rekonstrukcji pola dźwiękowego w zależności od zastosowanej metody akwizycji HRTF.

Literatura

- [1] Xiao-li Zhong and Bo-sun Xie, Head-Related Transfer Functions and Virtual Auditory Display, Intechopen, 2012
- [2] Michele Lucchi, MEMS speakers for HRTF measurement, USound, 2024
- [3] Ollie Turvey, Turret Lab, Audio Experience Design Imperial College London, 2024
- [4] Wightman F L, Kistler D J. Measurement and validation of human HRTFs for use in hearing research. Acta Acoustica United with Acoustica, 2005
- [5] Xie B S, Zhong X L, Rao D, et al. Head-related transfer function database and analyses. Science in China Series G, Physics, Mechanics & Astronomy. 2007
- [6] Mengqiu Zhang, Rodney A. Kennedy, Thushara Abhayapala HRTF measurement on KEMAR manikin, ACOUSTICS, 2009
- [7] Aidan O. T. Hogg, Mads Jenkins, He Liu, HRTF Upsampling With a Generative Adversarial Network Using a Gnomonic Equiangular Projection, Ieeexplore, 2024
- [8] A Brandmeyer, N Swedlow, M Hertensteiner, P Crum, Benefits of immersive spatial audio on athlete reaction times in e-sports, OSF, 2021

- [9] Stefania Serafin, Simone Spagnol, Connecting games to better spatialized audio, Aalborg University Copenhagen, 2020
- [10] Harry Jenkins, 3D scanning my head to further virtual reality research, Imperial, 2022