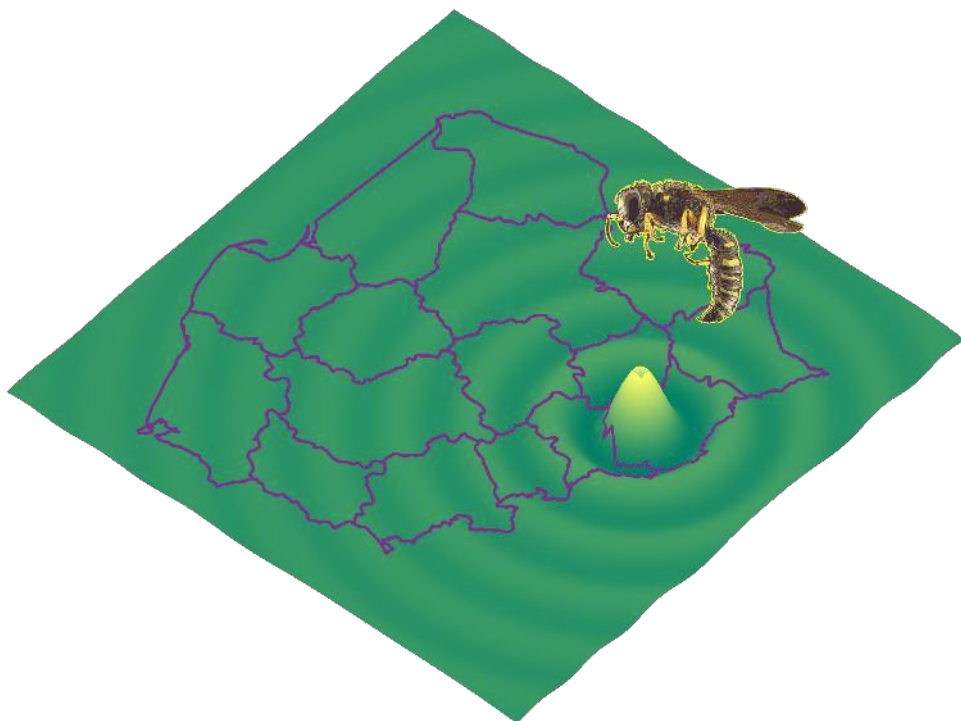


# POSTĘPY AKUSTYKI

**Polskie Towarzystwo Akustyczne**  
**Oddział w Krakowie**



REDAKCJA  
IRENEUSZ CZAJKA  
KATARZYNA SUDER-DEBSKA

Kraków 2021



POLSKIE TOWARZYSTWO AKUSTYCZNE  
ODDZIAŁ W KRAKOWIE

# POSTĘPY AKUSTYKI

REDAKCJA  
Ireneusz Czajka, Katarzyna Suder-Dębska

**Kraków 2021**

**Komitet naukowy:**

Wojciech BATKO, Adam BRAŃSKI, Zbigniew DĄBROWSKI, Andrzej DOBRUCKI, Marzena DZI-DA, Barbara GAMBIN, Natalia GORSKA, Grażyna GRELOWSKA, Tadeusz GUDRA, Arkadiusz JÓ-ZEFCZAK, Maciej KŁACZYŃSKI, Janusz KOMPAŁA, Eugeniusz KOZACZKA, Lucyna LENIOW-SKA, Bogumił LINDE, Jacek MARSZAL, Mirosław MEISSNER, Andrzej MIŚKIEWICZ, Andrzej NOWICKI, Krzysztof OPIELIŃSKI, Janusz PIECHOWICZ, Łukasz PIECZONKA, Anna PREIS, Prze-mysław PLASKOTA, Dariusz PLEBAN, Tadeusz PUSTELNY, Wojciech RDZANEK, Roman SALA-MON, Ewa SKRODZKA, Bartłomiej STĘPIEŃ, Antoni ŚLIWIŃSKI, Zbigniew WESOŁOWSKI, Ste-fan WEYNA, Jerzy WICIAK, Franciszek WITOS, Tadeusz WSZOŁEK, Jan ŻERA

Artykuły zostały zrecenzowane przez członków Komitetu Naukowego OSA 2021.

Wydrukowano na podstawie materiałów dostarczonych przez autorów.

**Skład i redakcja techniczna:** Ireneusz Czajka (AGH UST), Katarzyna Suder-Dębska (AGH UST)

ISBN: 978-83-61402-02-2

Wydawca:

Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

# Spis treści

|  |    |
|--|----|
| <b>Przedmowa</b> . . . . .   | 7  |
| <b>Rozdział 1. Wspomnienia o Profesorze Zbigniewie Engelu</b> . . . . .  | 9  |
| <b>I. AKUSTYKA POMIESZCZEŃ I BUDOWLI</b>   |    |
| <b>Rozdział 2. Rozkład poziomu dźwięku maskującego w pomieszczeniu biurowym open space</b>   | 15 |
| 2.1. Wstęp . . . . .   | 15 |
| 2.2. Zakres badań, metoda badań, kryteria oceny . . . . .  | 16 |
| 2.3. Wyniki badań . . . . .  | 18 |
| 2.4. Podsumowanie i wnioski . . . . .  | 21 |
| Podziękowania . . . . .  | 22 |
| Bibliografia . . . . .   | 22 |
| <b>Rozdział 3. Soundscape assessment in laboratory workspace relative to office space</b> . . . . .  | 25 |
| 3.1. Introduction . . . . .  | 25 |
| 3.2. Method and results . . . . .  | 27 |
| 3.2.1. First stage of studies . . . . .  | 27 |
| 3.2.2. Second stage of studies . . . . .   | 28 |
| 3.3. Discussion . . . . .  | 31 |
| Acknowledgements . . . . .   | 32 |
| Bibliography . . . . .   | 32 |
| <b>Rozdział 4. Badania pilotażowe uciążliwości hałasu w odniesieniu do charakterystyk czasowych, amplitudowych i częstotliwościowych dźwięku</b> . . . . . | 35 |
| 4.1. Wprowadzenie . . . . .  | 35 |
| 4.2. Materiał i metody . . . . .   | 36 |
| 4.3. Wyniki badań . . . . .  | 41 |
| 4.4. Wnioski . . . . .   | 42 |
| Bibliografia . . . . .   | 43 |
| <b>II. AKUSTYKA ŚRODOWISKOWA I OCHRONA PRZED HAŁASEM</b>   |    |
| <b>Rozdział 5. Leaky Partial Updates in Application to Structural Active Noise Control</b> . . . . .   | 47 |
| 5.1. Introduction . . . . .  | 47 |
| 5.2. Partial Update LMS Algorithms with Leakage . . . . .  | 48 |
| 5.3. Experimental setup . . . . .  | 50 |
| 5.4. Simulation results . . . . .  | 51 |
| 5.5. Conclusions . . . . .   | 53 |

|  |           |
|--|-----------|
| Acknowledgements . . . . .   | 54        |
| Bibliography . . . . .   | 54        |
| <b>Rozdział 6. Metody oceny parametrów ekranów akustycznych z modułami fotowoltaicznymi</b>  | <b>57</b> |
| 6.1. Wprowadzenie . . . . .  | 57        |
| 6.2. Metody obliczeniowe . . . . .   | 58        |
| 6.3. Metoda i stanowisko pomiarowe . . . . .   | 60        |
| 6.4. Porównanie zastosowanych metod . . . . .  | 63        |
| 6.5. Podsumowanie . . . . .  | 64        |
| Bibliografia . . . . .   | 64        |
| <b>Rozdział 7. Curve squeal – how is it influenced by different conditions? Statistical analysis of the noise generated at curves on the Stockholm metro</b> | <b>67</b> |
| 7.1. Introduction . . . . .  | 67        |
| 7.2. About the project . . . . .   | 67        |
| 7.3. What does a curve squeal look like? Closer look into squeal events . . . . .  | 68        |
| 7.4. Screening assessment . . . . .  | 71        |
| 7.5. Prediction model – detailed investigation . . . . .   | 74        |
| 7.6. Conclusions . . . . .   | 76        |
| Bibliography . . . . .   | 78        |
| <b>Rozdział 8. Sprawdzenie spełnienia wymagań normatywnych dotyczących wyposażenia i warunków przeprowadzenia badań tłumienia dźwięku ochronników słuchu</b> | <b>79</b> |
| 8.1. Wprowadzenie . . . . .  | 79        |
| 8.2. Obiekt i metodyka badań . . . . .   | 80        |
| 8.2.1. Sprawdzenie toru pomiarowego . . . . .  | 81        |
| 8.2.2. Sprawdzenie obszaru testowego . . . . .   | 82        |
| 8.3. Wyniki . . . . .  | 83        |
| 8.3.1. Sprawdzenie toru pomiarowego . . . . .  | 83        |
| 8.4. Podsumowanie . . . . .  | 87        |
| Bibliografia . . . . .   | 88        |
| <b>Rozdział 9. Model bariery akustycznej z wykorzystaniem warstwowych struktur kryształów sonicznych</b>   | <b>89</b> |
| 9.1. Wprowadzenie . . . . .  | 89        |
| 9.2. Materiał i metody . . . . .   | 90        |
| 9.3. Wyniki badań . . . . .  | 93        |
| 9.4. Wnioski i podsumowanie . . . . .  | 95        |
| Bibliografia . . . . .   | 95        |
| <b>III. ELEKTROAKUSTYKA</b>  |           |
| <b>Rozdział 10. Wskaźnik transmisji mowy w projektowaniu systemów nagłaśniania – metoda uproszczona dla systemów centralnych</b>                             | <b>99</b> |
| 10.1. Wprowadzenie . . . . .   | 99        |
| 10.2. Metody projektowania według CEN/TS 54-32 . . . . .   | 100       |
| 10.3. Koncepcja zaproponowanej metody . . . . .  | 101       |
| 10.4. Wpływ poziomu dźwięku i stosunku sygnału do zakłóceń na <i>STIPA</i> . . . . .   | 102       |
| 10.5. Graniczne warunki akustyczne . . . . .   | 103       |
| 10.6. Podsumowanie . . . . .   | 106       |
| Bibliografia . . . . .   | 106       |

## IV. METROLOGIA I PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW

|   |     |
|---|-----|
| <b>Rozdział 11. DOP and Pseudorange Error Estimation in Mobile GNSS Systems for Android OS Applications</b> . . . . . | 111 |
| 11.1. Introduction . . . . .  | 111 |
| 11.2. Android Consumer Devices . . . . .  | 112 |
| 11.2.1. Positioning Accuracy . . . . .  | 112 |
| 11.2.2. Navigation in Android OS . . . . .  | 113 |
| 11.3. The study . . . . .   | 113 |
| 11.3.1. Mobile Devices . . . . .  | 113 |
| 11.3.2. Evaluated Routes . . . . .  | 114 |
| 11.4. Summary . . . . .   | 117 |
| Bibliography . . . . .  | 118 |

## V. PSYCHOAKUSTYKA I AKUSTYKA SŁUCHU

|  |     |
|--|-----|
| <b>Rozdział 12. Różnica w subiektywnej ocenie jakości mowy pomiędzy nastolatkami dwujęzycznymi a jednojęzycznymi</b> . . . . .   | 121 |
| 12.1. Wprowadzenie . . . . .   | 121 |
| 12.2. Eksperyment . . . . .  | 122 |
| 12.2.1. Grupa badawcza . . . . .   | 122 |
| 12.2.2. Materiał testowy . . . . .   | 123 |
| 12.2.3. Pomiar jakości . . . . .   | 123 |
| 12.3. Wyniki . . . . .   | 124 |
| 12.4. Podsumowanie . . . . .   | 126 |
| Bibliografia . . . . .   | 126 |
| <b>Rozdział 13. Zjawisko masking release – wpływ wieku i wielkości ubytku słuchu</b> . . . . .   | 129 |
| 13.1. Wprowadzenie . . . . .   | 129 |
| 13.2. Testy zrozumiałości mowy . . . . .   | 130 |
| 13.3. Pomiar zrozumiałości mowy . . . . .  | 131 |
| 13.4. Wyniki . . . . .   | 133 |
| 13.5. Podsumowanie . . . . .   | 136 |
| Podziękowania . . . . .  | 136 |
| Bibliografia . . . . .   | 137 |
| <b>Rozdział 14. Ewaluacja parametru najmniejszego słyszalnego kąta (<i>Minimum Audible Angle</i>) w sferycznym ambisonicznym systemie odtwarzania 3-go rzędu</b> . . . . . | 139 |
| 14.1. Wstęp teoretyczny i motywacja . . . . .  | 139 |
| 14.2. Cel i podstawa teoretyczna . . . . .   | 140 |
| 14.2.1. Mechanizmy słyszenia przestrzennego . . . . .  | 140 |
| 14.2.2. Badanie referencyjne . . . . .   | 140 |
| 14.2.3. Badanie właściwe . . . . .   | 141 |
| 14.3. Eksperyment . . . . .  | 141 |
| 14.3.1. Stanowisko testowe . . . . .   | 141 |
| 14.3.2. Przebieg eksperymentu z zastosowaniem tonów prostych . . . . .   | 141 |
| 14.3.3. Eksperyment z zastosowaniem szumu gaussowskiego . . . . .  | 142 |
| 14.4. Omówienie wyników i dyskusja . . . . .   | 143 |
| Bibliografia . . . . .   | 145 |
| <b>Indeks autorów</b> . . . . .  | 147 |





# Przedmowa

Otwarte Seminarium z Akustyki (OSA) jest coroczną, największą w kraju konferencją skupiającą od ponad sześćdziesięciu lat czołowych polskich akustyków. Organizowane jest cyklicznie przez kolejne oddziały Polskiego Towarzystwa Akustycznego – w roku 2021 przez Oddział Krakowski.

Bieżący rok 2021 jest pod wieloma względami szczególny. Najbardziej wyjątkowa jest pandemia, która od półtora roku dezorganizuje prace naukowców, dydaktyków i studentów. Dlatego też i LXVII Otwarte Seminarium z Akustyki jest wyjątkowe, ponieważ pokazuje, że pomimo trudności zewnętrznych, akustycy z całej Polski prowadzą prace naukowe, kształcą młode kadry i dzielą się swymi odkryciami z szerokim gronem odbiorców. Ta elastyczność dowodzi, że pomimo osobistych przyzwyczajień, grono akustyków jest elastyczne i skupione na celach.

Jako Komitet Organizacyjny dołożyliśmy starań, by sprostać oczekiwaniom uczestników i nadać tej Konferencji rangę właściwą największej konferencji Polskiego Towarzystwa Akustycznego. Ze względu na wyjątkową zdalną formę, uczestnicy będą mogli skorzystać z naukowych wartości prezentowanych przez Prelegentów.

Oddajemy do Państwa rąk zbiór artykułów naukowych, tradycyjnie zatytułowany „*Postępy akustyki*”. W niniejszym tomie zaprezentowano 13 artykułów opracowanych przez 24 autorów, które stanowią niewielką część nadesłanych na Seminarium prac.

Oprócz tych prac, tom zawiera wspomnienie o profesorze Zbigniewie Engelu, jednym z twórców wibroakustyki i nieodżałowanym nauczycielu i współpracowniku.

Wyrażamy nadzieję, że zarówno Konferencja, jak i przygotowany tom, staną się źródłem informacji o aktualnie prowadzonych w polskich ośrodkach naukowych badaniach z zakresu akustyki.

Komitet Organizacyjny OSA 2021



## Rozdział 1

# Wspomnienia o Profesorze Zbigniewie Engelu

Wojciech Batko, Jerzy Wiciak

*Akademia Górniczo-Hutnicza*

e-mail: [batko@agh.edu.pl](mailto:batko@agh.edu.pl), [wiciak@agh.edu.pl](mailto:wiciak@agh.edu.pl)



Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Engela dr h. c. multi  
1933–2013

Profesor dr hab. inż. Zbigniew ENGEL urodził się dnia 1 kwietnia 1933 roku w Zawadach koło Żółkwi w województwie lwowskim. Po ukończeniu Gimnazjum i Liceum Ogólnokształcącego im. Jana Matejki w Wieliczce w roku 1950 uzyskał świadectwo dojrzałości. W tym samym roku rozpoczął też studia na Wydziale Komunikacji Wydziałów Politechnicznych Akademii Górniczo-Hutniczej (Politechnika Krakowska). Działalność naukowo – dydaktyczną rozpoczął w 1952 roku jako zastępca asystenta w Katedrze Mechaniki Technicznej Akademii Górniczo-Hutniczej. W 1962 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych, zaś w roku 1966 stopień doktora habilitowanego. W roku 1973 uzyskał tytuł naukowy profesora nadzwyczajnego, a w roku 1978 tytuł profesora zwyczajnego. W Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie zatrudniony był do końca ro-

ku 2003, aż do chwili przejścia na emeryturę. Twórcze dokonania Profesora Zbigniewa Engela dotyczyły następujących zagadnień:

- dynamiki maszyn,
- drgań mechanicznych różnych układów mechanicznych,
- techniki wibracyjnej,
- akustyki środowiska i powiązanych z nią rozwiązań służących zwalczaniu hałasu i wibracji,
- metod aktywnych redukcji drgań i hałasu.

Zadania problemowe rozwiązywane przez Profesora z tego obszaru badawczego dały początek nowej dyscypliny naukowej – wibroakustyki. W tym zakresie inicjatywa i prace Profesora Engela: zapoczątkowane z końcem lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia dały podwaliny do powstania tej nowej dyscypliny naukowej. Profesor Zbigniew Engel uważany jest za twórcę wibroakustyki – nauki zespajającej osiągnięcia teorii drgań układów mechanicznych z mechaniką zjawisk akustycznych w jeden sprzężony model mechaniczno – akustyczny. Profesor Zbigniew Engel sformułował podstawowe zadania wibroakustyki, określił jej pole badawcze, wytyczył dla niego zasadnicze cele. Związane one były z zadaniami: identyfikacji źródeł energii wibroakustycznej; identyfikacji dróg przenoszenia tej energii oraz analizy sposobów transformacji energii wibroakustycznej; wykorzystania procesów wibroakustycznych do diagnostyki stanów maszyn, urządzeń konstrukcji czy obserwowanych procesów; czynne wykorzystanie procesów wibroakustycznych dla potrzeb realizacji określonych procesów technologicznych; syntezy wibroakustycznej maszyn, urządzeń i obiektów badawczych; sterowania energią wibroakustyczną, i budową aktywnych układów redukcji drgań i hałasu.

Realizowane projekty i badania badawcze dotyczyły m.in. poszukiwań rozwiązań konstrukcyjnych prowadzących do obniżenia zagrożenia hałasem i wibracjami człowieka, w środowisku jego życia i pracy. Jego prace zaowocowały powstaniem wielu nowych kierunków badań i innowacyjnych rozwiązań technicznych. Był inicjatorem i organizatorem budowy kompleksowych laboratoriów wibroakustycznych w AGH, z pawilonem wibroakustyki. Dzięki jego staraniom i działaniom powstały w Krakowie unikalne w skali światowej laboratoria do badania procesów wibroakustycznych, z komorami bezechowymi oraz komorami pogłosowymi wyposażonymi w najnowocześniejszą aparaturę, w którym mógł Profesor wraz zespołem swoich współpracowników rozwijać nową dziedzinę wiedzy – wibroakustykę, tworzyć jej podstawy metodologiczne, i dokumentować jej istotność dla gospodarki i przemysłu licznymi aplikacjami. Podejmowane i rozwiązywane przez Profesora, Jego uczniów i bliskich współpracowników problemy naukowe, nadały wysoką naukową pozycję na mapie ośrodków akademickich w kraju i na świecie, zbudowanego i kierowanego przez niego zespołu naukowego Katedry Mechaniki i Wibroakustyki AGH.

Pełnił szereg odpowiedzialnych funkcji na naszej uczelni, wśród których należy wymienić funkcje: pełnomocnika Rektora AGH dla spraw organizacji dydaktyki, kierownika Punktu Konsultacyjnego AGH w Kielcach (na bazie którego powstała Wyższa Szkoła Inżynierska, a następnie Politechnika Świętokrzyska), kierownika Studium Wieczorowego Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH, prodziekana Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH. Był twórcą i wieloletnim dyrektorem Instytutu, a następnie Katedry Mechaniki i Wibroakustyki. Jako wieloletni członek Senatu AGH kierował pracami kilku senackich specjalnych komisji, których przedmiotem działania była reforma uczelni. Opiekował się młodszymi pracownikami nauki, promując nowych doktorów oraz występując jako recenzent w przewodach doktorskich i habilitacyjnych, czy będąc autorem wniosków dotyczących przyznania tytułu profesora i wniosków dotyczących powołania na stanowisko profesora nadzwyczajnego. Wypromował 40 doktorów. Wielu jego wychowanków uzyskało stopień doktora habilitowanego oraz tytuł profesora. Rezultatem tych rozległych zainteresowań było ponad 600 publikacji, 15 patentów oraz niezliczona ilość prac, opracowań, ekspertyz i opinii wykonanych dla przemysłu. Współpraca z zagranicą to bardzo ważny rozdział w życiorysie profesora Engela. Profesor aktywnie współpracował z instytucjami i organizacjami naukowymi z całego świata, m.in. z: Purdue University (USA), MIT (USA), Uniwersytetem Fila-

delfijskim (USA), uniwersytetami technicznymi w Wiedniu, Bratysławie, Kopenhadze, Tokio, Kijowie, Instytutem Materiałów i Mechaniki Maszyn Słowackiej Akademii Nauk, Instytutem Politechnicznym w Petersburgu, Instytutem Budowy Maszyn Rosyjskiej Akademii Nauk, Politechniką Lwowską. Efektem tej działalności było uznanie jakim cieszył się Profesor w środowisku naukowym, co znalazło swoje odzwierciedlenie w licznie mu przyznawanych członkostwach w wielu prestiżowych organizacjach jak np.: Akademii Inżynierskiej w Polsce, Nowojorskiej Akademii Nauk, Petersburskiej Akademii Nauk, Academie Europeenne des Sciences, des Arts et des Lettres; Institute of Noise Control Engineering USA, Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej, Deutsche Gesellschaft für Akustik, Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik, Polskiego Towarzystwa Akustycznego, Ligi Walki z Hałasem, Wschodnio-Europejskiego Towarzystwa Akustycznego w Petersburgu oraz Związku Uczonych i Inżynierów w Moskwie. Profesor Zbigniew Engel był członkiem wielu komitetów naukowych konferencji i kongresów m.in. w Miami, Edynburgu, Monachium, Pekinie, Avignon, Newport Beach, Toronto, Hadze, Budapeszcie, Seulu, Pradze, Rio de Janeiro. Przewodniczył Komitetom Naukowym Konferencji „Noise and Vibration in Transport” w Petersburgu. Za swoją działalność na arenie międzynarodowej został uhonorowany m.in.. Złotym Medalem im. Křižíka – Czechosłowackiej Akademii Nauk oraz Medalem Węgierskim „PRO SILENTIA”. Profesor był też głównym pomysłodawcą i organizatorem Międzynarodowych Konferencji Zwalczenia Hałasu NOISE CONTROL.

Pomimo przejścia na emeryturę Profesor Zbigniew Engel nie zaprzestał swojej działalności naukowej aż do ostatnich dni życia. Brał udział w krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, realizował projekty badawcze, pisał i publikował kolejne prace i monografie, przewodniczył działaniom Rady Naukowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy w Warszawie. Przez ponad 40 lat był członkiem Rady Naukowej Instytutu, a przez ostatnie 15 lat jej przewodniczył. Praktycznie od podstaw stworzył tam Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych, angażując i mobilizując do pracy znakomitych specjalistów z całej Polski. Dzięki niemu powstał niezależny i liczący się ośrodek naukowy i badawczy. Był przewodniczącym Komitetu Akustyki Polskiej Akademii Nauk, oraz Komisji Mechaniki Stosowanej Krakowskiego Oddziału PAN, a także wiceprzewodniczącym Rady Głównej i Szkolnictwa Wyższego. Otrzymał godność Honorowego Profesora Politechniki Warszawskiej, a za wyjątkowe zasługi w kształceniu młodej kadry naukowej został uhonorowany tytułem Doktora Honoris Causa przez Senat Uczelni: Akademii Górniczo-Hutniczej, Politechniki Krakowskiej oraz Politechniki Świętokrzyskiej.



Pomimo zaangażowania w sprawy naukowo-akademickie Profesor potrafił wygospodarować jeszcze czas na działalność społeczną. Do takiej działalności można zaliczyć aktywne uczestniczenie w życiu lokalnej społeczności. Był członkiem Klubu Przyjaciół Wieliczki i uczestniczył w różnych inicjatywach tej organizacji. W ostatnich latach, od 2011 r. włączył się w prace Uniwersytetu Trzeciego Wieku utworzonego w Wieliczce, gdzie pełnił funkcję Przewodniczącego Rady Programowej. Był założycielem Fundacji Rodziny Engelów, która przyznaje coroczne Nagrody imienia Profesora Engela, za najlepszą pracę naukową np. rozprawę habilitacyjną, pracę doktorską, monografię, cykl artykułów itp. Nagrody te przyznawane są młodym pracownikom naukowo – dydaktycznym Akademii Górniczo-Hutniczej, Poli-

techniki Krakowskiej oraz Politechniki Świętokrzyskiej. Za swoją działalność Profesor otrzymał liczne nagrody i wysokie odznaczenia państwowe: Krzyż Komandorski Orderu Odrodzenia Polski (OOP), Krzyż Oficerski OOP, Krzyż Kawalerski OOP, Złoty Krzyż Zasług, oraz Medal Komisji Edukacji Narodowej. Był również laureatem wielu nagród m.in.: Nagród Ministra Szkolnictwa Wyższego, Ministra Edukacji Narodowej, Ministra Budownictwa oraz Nagrody Stołecznego Królewskiego Miasta Krakowa w dziedzinie nauki i techniki.



20 października 2014 roku budynkowi D-1 AGH nadano imię prof. Zbigniewa Engela, a w holu budynku D-1 odsłonięto tablicę poświęconą Jego pamięci. Historia życia naukowego profesora Zbigniewa Engela, związanego 63 letnią pracą w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki to fragment wspaniałej historii nauki polskiej.

**Część I**

# **AKUSTYKA POMIESZCZEŃ I BUDOWLI**





## Rozdział 2

# Rozkład poziomu dźwięku maskującego w pomieszczeniu biurowym open space

Witold Mikulski

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

e-mail: [wimik@ciop.pl](mailto:wimik@ciop.pl)

W pomieszczeniu biurowym open space o objętości ok. 218 m<sup>3</sup> przeprowadzono badania równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym. Badania wykonano metodą obliczeniową. Dźwięk maskujący emitowały wszechkierunkowe źródła dźwięku emitujące szum różowy. Źródła te umieszczone były w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym. Równomierność nagłośnienia określano *odchyleniem standardowym poziomu dźwięku A* na stanowiskach pracy. W badaniach uwzględniono wpływ liczby i rozmieszczenia źródeł maskujących. Stwierdzono, że geometria pomieszczenia (proporcje pomieszczenia 4,8x1,8x1), nierównomierne rozmieszczenie materiałów dźwiękochłonnych i ekranów akustycznych oraz równomierne (w siatce kwadratowej) rozmieszczenie źródeł maskujących nie powoduje uzyskania akceptowalnej nierównomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym stanowisk pracy. Większą równomierność nagłośnienia można uzyskać umieszczając źródła maskujące w jednej linii równoległej do powierzchni dłuższej ściany bocznej pomieszczenia. Dla uzyskania *odchylenia standardowego*, z wartości *poziomu dźwięku A* na stanowiskach pracy, nie większego od 0,8 dB, konieczne jest zastosowanie takiej samej liczby źródeł maskujących jak liczba kolumn stanowisk pracy (kolumnę stanowią stanowiska pracy umieszczone obok siebie prostopadłe do dłuższej ściany bocznej pomieszczenia).

### 2.1. Wstęp

Biurowe pomieszczenia open space wymagają specyficznego środowiska akustycznego, którego uzyskanie jest możliwe po zapewnieniu odpowiednich właściwości akustycznych pomieszczenia. Na stanowiskach pracy w tych pomieszczeniach nie są przekroczone poziomy dopuszczalne hałasu ze względu na utratę słuchu (podane w Rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. [1]). Nie są także przekroczone poziomy dopuszczalne hałasu ze względu na “możliwość realizacji podstawowych zadań pracy” (podane w PN-N-01307:1994 [2]). Dlatego podstawową uciążliwością w akustycznym środowisku pracy w tych pomieszczeniach są dźwięki rozmów, które dekoncentrują pracowników [3, 4]. Należy, więc w tych pomieszczeniach: po pierwsze – ograniczyć

propagację dźwięków niepożądanych (głównie rozmów) [4]– [8], po drugie ograniczyć możliwość ich percepcji przez pracowników [8]– [11]. To pierwsze realizowane jest przez ograniczenie bezpośredniej propagacji dźwięków (ekrany akustyczne, przeszkody) oraz dźwięków odbitych (materiały dźwiękochłonne na powierzchniach, od których odbija się dźwięk tj. na ścianach, stropie, podłodze) [12]– [14]. To drugie wykonuje się przez zastosowanie źródeł maskujących dźwięki niepożądane [6] [9]– [11]. W normach PN–B–02151–4:2015 [15] (przywołana w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017r. [16]) i PN EN ISO 3382–3:2012 [17], określone są kryteria oceny tych pomieszczeń, których spełnienie potwierdza uzyskanie odpowiednich warunków akustycznych w tych pomieszczeniach. (Rozszerzone kryteria podano w [18]). Z poprzednich publikacji autora wynika, że dla uzyskania odpowiedniego środowiska akustycznego w biurowych pomieszczeniach open space (określonych ww. kryteriami wg PN–B–02151–4:2015 [15] i PN EN ISO 3382–3:2012 [17]) konieczne jest zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiałów dźwiękochłonnych na ścianach, ekranów akustycznych o wysokości ok. 1,5 m [7] [8] [12]– [14] oraz dźwięków maskujących o poziomie dźwięku w zakresie 30–35 dB [9]– [14]. Nie jest konieczne uzyskanie odpowiednich warunków akustycznych środowiska w całym pomieszczeniu, natomiast warunki te trzeba zapewnić na stanowiskach pracy. Biorąc pod uwagę konieczność zastosowania maskowania dźwięków niepożądanych na stanowiskach pracy, z jednoczesnym ograniczeniem ich do minimalnie koniecznego poziomu (w tym obligatoryjnie poniżej poziomu dopuszczalnego podanego w PN–N–01307:1994 [2]), wynika, że jednym z aspektów zastosowania maskowania jest uzyskanie równomiernego nagłośnienia w pomieszczeniu dźwiękami maskującymi na stanowiskach pracy. W artykule rozpatruje się wpływ liczby oraz rozmieszczenia źródeł maskujących, w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym, na równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym na stanowiskach pracy, w wybranym typowym biurowym pomieszczeniu open space.

## 2.2. Zakres badań, metoda badań, kryteria oceny

Badania dotyczą określenia metodami obliczeniowymi równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia biurowego open space. W szczególności uzyskania zbliżonych wartości *poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego na stanowiskach pracy. Do oceny uzyskania równomiernego nagłośnienia zastosowano wielkość: *odchylenie standardowe poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego na wszystkich stanowiskach pracy.

Badanie przeprowadzono w pomieszczeniu, którego rzut pokazano na rys. 2.1. Wymiary pomieszczenia 14,2 m x 5,2 m x 2,95 m, objętość/kubatura pomieszczenia ok. 218 m<sup>3</sup>, pole powierzchni rzutu pomieszczenia ok. 74 m<sup>2</sup>.

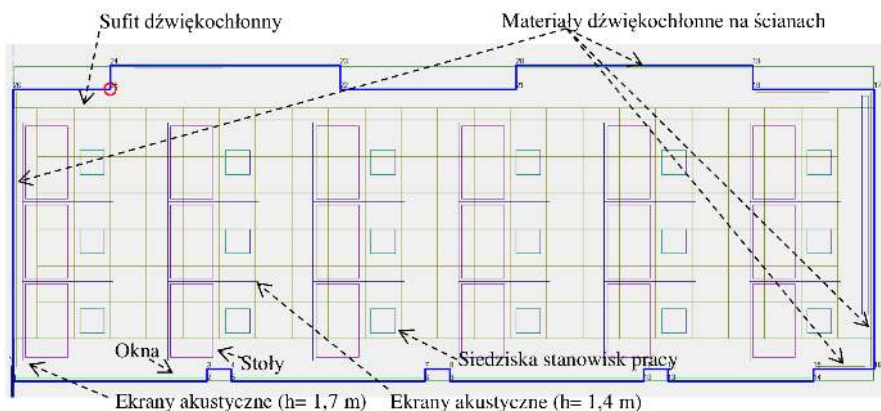
Wszystkie elementy adaptacji akustycznej (materiały dźwiękochłonne na ścianach, dźwiękochłonny sufit podwieszany, ekrany akustyczne) miały ważony wskaźnik pochłaniania dźwięku powierzchni  $\alpha_w$  równy 0,9.

Liczba stanowisk pracy wynosiła 18, umieszczanych w trzech rzędach/wierszach w sześciu kolumnach. Średnia odległość stanowisk pracy w osi OX wynosi 2,4 m, a w osi OY 1,3 m.

Dane akustyczne pomieszczenia podano w tabeli 2.1. Pomieszczenie spełniało kryteria podane w normach PN–B–02151–4:2015 [15] i PN–EN ISO 3382–3:2012 [17].

Źródła dźwięku maskującego emitowały szum różowy w zakresie częstotliwości obejmującym pasma oktawowe z zakresu 63–8000 Hz. Wszystkie źródła miały taką samą moc akustyczną i wszechkierunkowe charakterystyki promieniowania dźwięku. Źródła dźwięku położone były w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym. Na rys. 2.2 pokazano w uproszczeniu dźwiękochłonny sufit podwieszany (rzut) składający się z elementów/kasetonów dźwiękochłonnych o wymiarach 0,6 m x 0,6 m (patrz też rys. 2.1). Na tym rysunku pokazano lokalizację w suficie podwieszanym sześciu źródeł maskujących. Źródła maskujące oznaczono znakiem “x”. Taki układ źródeł maskujących określano w artykule nazwą “6(3,2)”

(pierwsza cyfra oznacza liczbę źródeł, druga liczbę kolumn źródeł, a trzecia liczbę wierszy/rzędów źródeł). Dodanie litery "b" po nawiasie np. "6(3,2)b", oznacza inny wariant takiego samego układu.

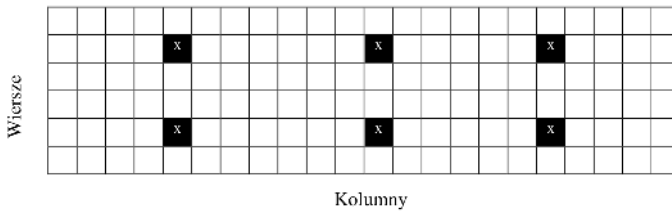


Rys. 2.1. Rzut rozpatrywanego pomieszczenia (wygenerowany w programie ODEON)

Tabela 2.1

Dane akustyczne pomieszczenia. Kolor zielony tła oznacza spełnienie kryterium. (Uwaga: Spadek poziomu dźwięku  $A$  mowy na podwojenie odległości  $D_{2,S}$  określany jest w literaturze także jako różnica poziomów dźwięku  $A$  od źródła wzorcowego mowy w odległości 1 i 2 m)

| Wielkości charakteryzujące właściwości akustyczne pomieszczenia   |      | Kryterium wg PN-B-02151-4:2015 [15] | Kryterium wg PN-EN ISO 3382-3:2012 [17] | Obliczone |
|---|------|-------------------------------------|---|-----------|
| Czas pogłosu (w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwości środkowej $f$ w Hz) $T_p$ , sekundy   | 63   |                                     |   | 0,87      |
|   | 125  |                                     |   | 0,47      |
|   | 250  |                                     |   | 0,26      |
|   | 500  |                                     |   | 0,31      |
|   | 1000 |                                     |   | 0,29      |
|   | 2000 |                                     |   | 0,36      |
|   | 4000 |                                     |   | 0,25      |
|   | 8000 |                                     |   | 0,22      |
| Chłonność akustyczna pomieszczenia odniesiona do 1m <sup>2</sup> podłogi (w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwości środkowej $f$ w Hz), $A_{1m2,f}$ , m <sup>2</sup> | 63   |                                     |   | 0,55      |
|   | 125  |                                     |   | 1,01      |
|   | 250  |                                     |   | 1,82      |
|   | 500  | $A_{1m2,f} \geq 1,1$                |   | 1,53      |
|   | 1000 | $A_{1m2,f} \geq 1,1$                |   | 1,64      |
|   | 2000 | $A_{1m2,f} \geq 1,1$                |   | 1,32      |
|   | 4000 |                                     |   | 1,90      |
| 8000  |      |                                     | 2,16                                    |           |
| Poziom dźwięku $A$ mowy w odległości 4m, $L_{p,A,S,4m}$ , dB  |      |                                     | $L_{p,A,S,4m} \leq 48$                  | 34,58     |
| Spadek poziomu dźwięku $A$ mowy na podwojenie odległości, $D_{2,S}$ , dB  |      |                                     | $D_{2,S} \geq 7$                        | 7,29      |
| Promień rozproszenia, $r_D$ , m   |      |                                     | $r_D \leq 5$                            | 4,75      |
| Promień prywatności, $r_p$ , m  |      |                                     |   | 10,16     |
| Wskaźnik transmisji mowy na najbliższym stanowisku pracy $STI_{near}$   |      |                                     |   | 0,63      |
| Poziom dźwięku $A$ tła akustycznego (bez uwzględnienia dźwięku maskującego) $L_{p,A,B}$ , dB  |      |                                     |   | 30        |



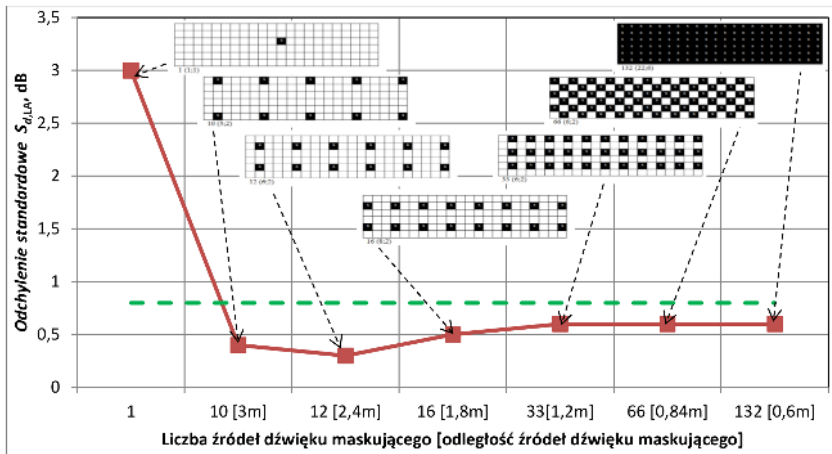
**Rys. 2.2.** Szkic rzutu elementów dźwiękochłonnych o wymiarach 0,6 m x 0,6 m w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym pomieszczenia (jak na rys. 2.1) z zaznaczeniem położenia sześciu źródeł maskujących (układ źródeł 6(3;2))

W biadaniach została zastosowana metoda obliczeniowa w oparciu o geometryczne metody symulacji pola akustycznego we wnętrzach, zaimplementowana w programie komputerowym ODEON [19].

Jako kryterium odpowiedniego (zadawalającej nierównomierności) rozkładu poziomu dźwięku maskującego pomieszczenia przyjęto *odchylenie standardowe poziomu dźwięku A*  $S_{d,LA}$  dźwięku maskującego nie większe niż 0,8 dB [20].

### 2.3. Wyniki badań

Na rys. 2.3 podano wyniki obliczeń *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego na stanowiskach pracy, emitowanego przez różną liczbę źródeł maskujących rozmieszczonych równomiernie w siatce kwadratowej (jedno źródło, a następnie źródła maskujące w odległości 3 m; 2,4 m; 1,8 m; 1,2 m; 0,84 m i 0,6 m).



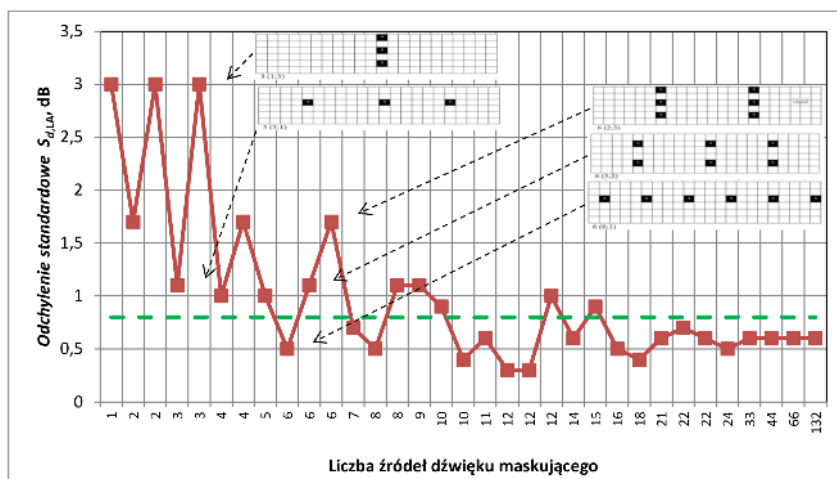
**Rys. 2.3.** *Odchylenie standardowe poziomu dźwięku A*  $S_{d,LA}$  dźwięku maskującego na stanowiskach pracy dla różnej liczby rozmieszczonych równomiernie źródeł maskujących (czarne oczka siatki oznaczają położenie źródeł maskujących; jak wyżej podano średnia odległość w osi OX stanowisk pracy wynosi 2,4 m; linią przerywaną oznaczono przyjętą wartość dopuszczalną odchylenia standardowego)

Przyjmując, że wartość *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* na stanowiskach pracy nie może przekroczyć 0,8 dB, to minimalna liczba źródeł maskujących rozmieszczonych w siatce kwadratowej źródeł w tym pomieszczeniu wynosi 10 (układ 10(5;2)), to znaczy, że źródła maskujące mogą być rozmieszczone co ok 3 m. Dla takiej liczby źródeł maskujących rozmieszczonych równomiernie źródeł maskujących w siatce kwadratowej *odchylenie standardowe poziomu dźwięku A* na stanowiskach pracy jest równe 0,4 dB.

Najmniejszą wartość *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* równą 0,3 dB uzyskuje się dla 12 źródeł maskujących umieszczonych po 2 w 6 kolumnach (odległość źródeł 2,4 m, tj. w takiej samej odległości OX, jak odległość stanowisk pracy).

Ponieważ kształt rzutu pomieszczenia nie umożliwia badań z mniejszą liczbą źródeł maskujących umieszczonych w siatce kwadratowej niż 10, a ponadto ze względu na to, że dźwięk w pomieszczeniu nie będzie się w taki sam sposób propagował się w różnych kierunkach (co wynika np. z zastosowania ekranów akustycznych o różnych wysokościach), to dalej analizowano wpływ liczby i rozmieszczenia źródeł maskujących rozmieszczonych w siatkach prostokątnych lub zbliżonych do prostokątnych.

Na rys. 2.4 podano wyniki obliczeń *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego na stanowiskach pracy dla 33 kombinacji liczby i rozmieszczenia źródeł maskujących.



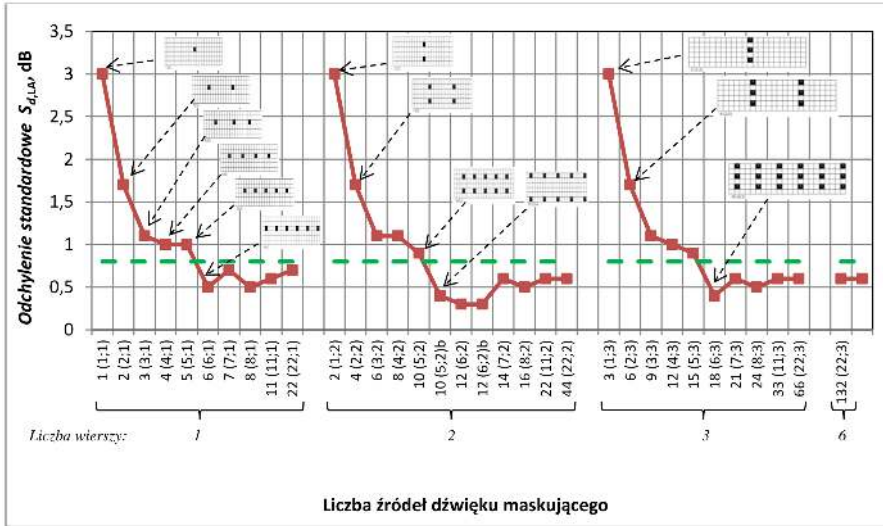
**Rys. 2.4.** *Odchylenie standardowe poziomu dźwięku A*  $S_{d,LA}$  na stanowiskach pracy dla różnej liczby źródeł rozmieszczonych równomiernie w siatce prostokątnej (przykładowo wskazano dla takiej samej liczby źródeł po 3 i 6, różne układy źródeł)

Z rys. 2.4 wynika, że wraz ze wzrostem liczby źródeł maskujących generalnie maleje wartość *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego na stanowiskach pracy. Malenie to jednakże nie ma charakteru monotonicznego. Można stwierdzić, że *odchylenie standardowe poziomu dźwięku A* jest mniejsze od kryterialnej wartości 0,8 dB dla liczby źródeł maskujących nie mniejszej niż 16. Jednocześnie można stwierdzić, że już dla 6 źródeł maskujących kryterium to jest spełnione, gdy źródła umieszczone są w jednej linii (wierszu) równoległej do powierzchni dłuższej ściany pomieszczenia. Wynika z tego, że spełnienie kryterium dla liczby źródeł maskujących od 6 do 15 zależy od ich rozmieszczenia w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym.

Zależność wpływu rozmieszczenia takiej samej liczby źródeł maskujących na równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym na stanowiskach pracy pokazano na rys. 2.4 dla dwóch przypadków. Pierwszy, gdy stosuje się 3 źródła maskujące, drugi, gdy stosuje się 6 źródeł maskujących. Wyraźnie

widać, że rozmieszczenie źródeł w jednej linii (równoległej do dłuższego boku pomieszczenia) pozwala uzyskać mniejsze wartości *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego tj. bardziej równomierne nagłośnienie dźwiękiem maskującym na stanowiskach pracy.

Właściwość tą łatwiej analizować rozpatrując wpływ liczby źródeł maskujących na równomierność nagłośnienia, niezależnie dla źródeł zlokalizowanych w jednym wierszu, dwóch wierszach i trzech wierszach (rys. 2.5).

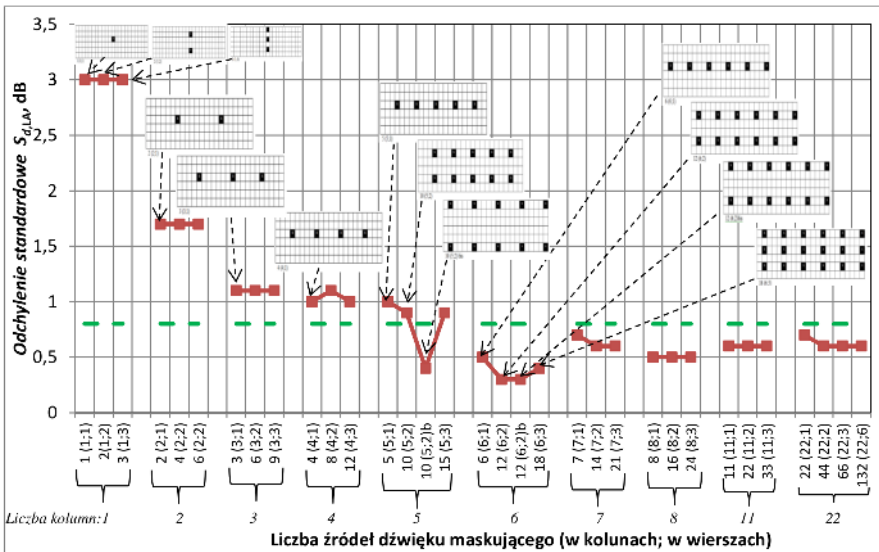


**Rys. 2.5.** Odchylenie standardowe poziomu dźwięku A  $S_{d,LA}$  dźwięku maskującego na stanowiskach pracy dla różnej liczby źródeł (dla źródeł zlokalizowanych w jednym wierszu, dwóch wierszach i trzech wierszach)

Porównując te trzy warianty (źródła maskujące w jednym, dwóch i trzech wierszach) można stwierdzić, że dla uzyskania spełnienia ww. kryterium ( $S_{d,LA} \leq 0,8$  dB), dla wariantu z jednym wierszem źródeł maskujących konieczne jest uwzględnienie 6 źródeł (tj. układ 6(6;1)), dla wariantu z dwoma wierszami źródeł maskujących konieczne jest uwzględnienie 12 źródeł (w dwóch wierszach po 6 źródeł tj. 12(6;2)), a dla wariantu z trzema wierszami źródeł konieczne jest uwzględnienie 18 źródeł (w trzech wierszach po 6 źródeł tj. 18(6;3)). (W wariantach z dwoma wierszami źródeł i 10 źródłami maskującymi spełnienie kryterium zależy od rozmieszczenia źródeł (patrz: tj. układy 10(5;2) i 10(5;2)b). Wynika z tego, że dla rozkładu poziomu dźwięku maskującego najbardziej istotne jest w ilu kolumnach znajdują się źródła maskujące, a ile będzie źródeł w kolumnie nie odgrywa już istotnego znaczenia.

Efekt ten jeszcze wyraźniej można zaobserwować na rys. 2.6. Podano na nim *odchylenie standardowe poziomu dźwięku A* dźwięku maskującego na stanowiskach pracy dla różnej liczby źródeł niezależnie dla źródeł zlokalizowanych w: jednej, dwóch, trzech, czterech, pięciu, sześciu, siedmiu, ośmiu, jedenastu i dwudziestu dwóch kolumnach.

Można zauważyć, że na rozkład nagłośnienia dźwiękiem maskującym na stanowiskach pracy, liczba kolumn źródeł maskujących ma istotne znaczenie, natomiast liczba źródeł w wierszach nie jest tak istotna. Można także zauważyć, że dla takiej samej liczby źródeł umieszczonych w tej samej liczbie wierszy i tej samej liczbie kolumn, układ źródeł maskujących w niektórych przypadkach ma także znaczenie (np. dla 10 źródeł układy źródeł 10(5;2) i 10(5;2)b; rys. 2.5 i 2.6), a w innych jest pomijalny (np. dla 12 źródeł układy źródeł 12(6;2) i 12(6;2)b; rys. 2.5 i 2.6).



**Rys. 2.6.** Odchylenie standardowe poziomu dźwięku A  $S_{d,LA}$  na stanowiskach pracy dla różnej liczby źródeł (niezależnie dla źródeł zlokalizowanych w jednej, dwóch, trzech, czterech, pięciu, sześciu, siedmiu, ośmiu, jedenastu i dwudziestu dwóch kolumnach)

## 2.4. Podsumowanie i wnioski

W istniejącym pomieszczeniu biurowym open space o objętości ok. 218 m<sup>3</sup> i wydłużonym kształcie, w którym znajdowało się 18 stanowisk pracy (w trzech rzędach po 3 stanowiska, to jest stanowiska w 6 kolumnach) przeprowadzono badania metodą obliczeniową równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym. Pomieszczenie spełniało kryteria akustyczne dla tego typu pomieszczeń (wg PN-B-02151-4:2015 i PN EN ISO 3382-3:2012). Kryteria te odnoszą się do średnich właściwości pomieszczenia, a jednym z elementów, który umożliwia uzyskanie odpowiednich właściwości środowiska akustycznego w tych pomieszczeniach jest zapewnienie odpowiedniego poziomu dźwięku A tła akustycznego. Tło to uzyskuje się przez zastosowanie odpowiedniej liczby źródeł emitujących dźwięki maskujące. Istotne jest, aby na wszystkich stanowiskach pracy dźwięk maskujący miał odpowiedni poziom, tj. wystarczająco duży, aby uzyskać efekt maskowania, a jednocześnie wystarczająco mały, aby nie przekroczyć poziomów dopuszczalnych. Implikuje to uzyskanie zbliżonych poziomów dźwięku maskującego na wszystkich stanowiskach pracy (tj. zapewnienie równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym na wszystkich stanowiskach pracy). W artykule równomierność nagłośnienia stanowisk pracy dźwiękiem maskującym określano wielkością fizyczną *odchylenie standardowe poziomu dźwięku A* na stanowiskach pracy. Badano wpływ na równomierność nagłośnienia stanowisk pracy dźwiękiem maskującym: liczby i rozmieszczenia źródeł maskujących. W wyniku badań stwierdzono, że geometria pomieszczenia, nierównomierne rozmieszczenie materiałów dźwiękochłonnych w pomieszczeniu oraz specyficzne rozmieszczenie i właściwości akustyczne ekranów akustycznych powodują takie właściwości akustyczne pomieszczenia, że aby uzyskać jednorodne nagłośnienie dźwiękiem maskującym na stanowiskach pracy, uwzględniając jak najmniejszą liczbę źródeł maskujących, nie jest uzasadnione rozmieszczenie źródeł maskujących geometrycznie w oczkach siatki kwadratowej. Z badań wynika, że źródła maskujące powinny się umieszczać w jednej linii (wierszu) równoległej do powierzchni dłu-

szej ściany bocznej pomieszczenia. Stwierdzenie to oparto na przykładzie pomieszczenia, w którym po 3 stanowiska pracy umieszczone były prostopadłe do dłuższej ściany pomieszczenia (tj. w kolumnie). W przypadkach większej liczby stanowisk pracy w kolumnie może być jednak konieczne umieszczenie źródeł w dwóch wierszach (liniach/rzędach). (W warunkach rzeczywistych przypadki takie tj., gdy większa liczba stanowisk pracy niż 3 znajduje się w kolumnie (obok siebie) prawdopodobnie będzie występował bardzo rzadko, gdyż wówczas bardzo trudno byłoby uzyskać odpowiednie warunki oświetleniowe światłem naturalnym na stanowiskach pracy). Zasadnicze znaczenie dla uzyskania równomiernego nagłośnienia dźwiękiem maskującym na stanowiskach pracy odgrywa liczba źródeł maskujących w wierszu (w tej jednej linii). Dla uzyskania *odchylenia standardowego poziomu dźwięku A* na stanowiskach pracy nie większego od 0,8 dB, konieczne jest zastosowanie takiej samej liczby źródeł jak liczba kolumn stanowisk pracy.

## Podziękowania

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego “Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021–2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii.

Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

## Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Zał. 2 punkt A.). DzU. z 2018 r., poz. 1286.
- [2] PN-N-01307:1994. Hałas – Dopuszczalne wartości parametrów hałasu w środowisku pracy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.
- [3] M. Zaglauer, H. Drotleff, A. Liebl, *Background babble in open-plan offices: A natural masker of disruptive speech?*, Applied Acoustics, 118, 1–7, 2017.
- [4] W. Mikulski, *Wyniki badań hałasu w otwartym pomieszczeniu biurowym – case study w pomieszczeniu o dużej chłonności akustycznej*, Konferencja XLVII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki, Oddział Górnośląski PTA oraz Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk, Szczyrk, 25.02–1.3.2019.
- [5] F. Davidsson, P. Hodsman, *Speech propagation in open-plan office: A cross over designed field study*, Proceeding of the 24th International Congress on Sound and Vibration, London, July 23–27, 2017.
- [6] A. Haapakangasa, V. Hongisto, *Distraction distance and perceived disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices*, Journal of the Acoustical Society of America, 141(1), 127–136, 2017.
- [7] W. Mikulski, *Acoustic conditions in open plan offices – Pilot test results*, Medycyna Pracy, 67(5), 653–662, 2016.
- [8] W. Mikulski, *Computational studies of speech intelligibility in open-plan offices*, Medycyna Pracy, 70(3), 327–342, 2017.
- [9] W. Mikulski, *Wpływ tła akustycznego na promień rozproszenia w pomieszczeniach biurowych wielokoprzestrzennych*, Konferencja XLVIII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki, Oddział Górnośląski PTA oraz Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk, Szczyrk, 24–28.02.2020.



- 
- [10] W. Mikulski, *Wpływ dźwięku maskującego zrozumiałość mowy na środowisko akustyczne w biurach typu open space – wyniki badań własnych*, *Bezpieczeństwo Pracy Nauka i Praktyka*, 12, 22–26, 2020.
- [11] W. Mikulski, *Materiały informacyjne. Wyniki przeprowadzonych badań maskowania dźwięków mowy oraz technicznych środków kształtowania pola akustycznego w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych*, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2020, w: [https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/91357/2SP05\\_2020\\_Mikulski\\_MaterialyInformacyjne.pdf](https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/91357/2SP05_2020_Mikulski_MaterialyInformacyjne.pdf) [01.01.2021]
- [12] W. Mikulski, *Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – zastosowanie środków technicznych w typowym pomieszczeniu*, *Medycyna Pracy*, 69(2), 153–165, 2018.
- [13] W. Mikulski, *Studies on acoustic properties of open-plan office rooms*, w: *Occupational noise and workplace acoustics. Advances in Measurement and Assessment techniques*, red. D. Pleban, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 173–220, 2020.
- [14] W. Mikulski, *Projektowanie adaptacji akustycznej otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych, Część 2, Projektowanie dodatkowe*, *Materiały Budowlane*, 9, 82–85, 2019.
- [15] PN-B-02151-4:2015. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach.
- [16] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Lp.60a, paragraf 323 ust. 2). DzU. z 2017 r. poz. 2285.
- [17] PN EN ISO 3382-3:2012, Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 3: Pomieszczenia biurowe typu “open space”.
- [18] W. Mikulski, *Ocena w skali trzystopniowej właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space o dużej kubaturze – case study*, *Medycyna Pracy*, 72, 2021 (w druku).
- [19] ODEON 16 Computer software.
- [20] W. Mikulski, A. Świdziski, *Masking sound distribution in open plan office room – case study base on simulation*, 27th International Congress on Sound and Vibration ICSV27, Praha, 11–16.07.2021.



## Rozdział 3

# Soundscape assessment in laboratory workspace relative to office space

Magdalena Miterska, Janusz Kompała

*Central Mining Institute, Department of Acoustics, Electronics and IT Solutions,  
40–166 Katowice, Poland*

e-mail: [mmiterska@gig.eu](mailto:mmiterska@gig.eu), [jkompala@gig.eu](mailto:jkompala@gig.eu)

This article presents the soundscape assessment results for laboratory space relative to office space. Laboratories are classified as a workspace that requires high concentration during work. Objective measurements revealed that laboratories do not exhibit exceeded permissible sound levels. Nevertheless, workers complain about their unfavourable soundscapes. The reason for this is the noise originating from apparatus and technical procedures. Acoustic pressure level measurements are not sufficient to assess acoustic comfort in a workspace. The subjective assessment of a soundscape is of equal importance to objective acoustic measurements. It makes it possible to identify and eliminate the sounds acknowledged as negative by the workers, which may in turn contribute to an improved sound assessment in laboratory space.

### 3.1. Introduction

With the rising awareness regarding the influence of sound on the human body, the need to seek solutions for improving the surrounding soundscape increases as well. This has considerable significance in the case of laboratory work, which requires particular concentration. Sound levels in laboratories rarely exceed their permissible limits, yet this does not entail the lack of unfavourable soundscapes that would have a negative influence on concentration in the workspace. “Soundscape” is a concept introduced by Raymond Murray Shafer. He popularised the notion of the “acoustic environment” that was initially rooted in music and fields of acoustic ecology studies. It quickly spread to other disciplines, such as acoustics, architecture, health, environment, psychology, sociology and urban planning, calling for attention and a holistic approach to the way humans comprehend the surrounding sounds and their perception [21]. A multi-disciplinary approach to the soundscape for purposes of acoustic environment management is becoming increasingly significant, as it focuses on the way humans actually perceive and experience the acoustic environment [13]. A more specific definition for this concept is also provided by standard ISO 12913–1:2014 Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual frame work [8], according to which a “soundscape is an acoustic environment as perceived and/or understood by

a person or people in context.” The context is understood as the relations between the person and the activity or place, in time and space [3, 7, 12]. Soundscape assessment, as per standard ISO 12913–1:2014 [8], is based on the human response to the acoustic environment. Determining the characteristics of a soundscape that produces certain human emotions (e.g. calm, irritation, displeasure, anxiety etc. other than pathogenic factors) extends significantly beyond mere acoustic pressure measurements [20].

An acoustic environment consists of sounds originating from various sources. Among the sounds that shape the soundscape, some can draw more attention than others through factors dependent not only on the physical properties of the signal (e.g. intensity) but also on its significance to the listener [18]. Results have shown [5] that sounds can be divided into categories with various levels of aggregation: general categories encompass sounds originating from similar sources (slamming or closing the door, engine sounds) or those that serve the same functions, e.g. alarm signals, an ambulance or a bicycle bell. As a result of this categorisation, the assignment of specific sounds to broader groups leads to perceiving the entire groups of sounds as pleasant or unpleasant. Thus, for example, noise associated with aeroplanes, traffic or building renovation is generally perceived as negative, whereas the sounds of nature are acknowledged as equally positive [14]. A person participating in an acoustic environment has no influence on the awareness of their own contribution to the soundscape [2].

A sound assessment in a given location must be considered both in terms of the function that the location is meant to serve, and with regard to the adjacent acoustic environment and other neighbouring locations. A sonic environment is perceived in a different manner when it does not undergo significant changes over time compared to when it is variable. A sound that is stable over time is perceived differently immediately after engaging the sound source, and differently when it is heard for an extended period of time. The reason for this is auditory adaptation – the response of the receptor to a stimulus that is stable over time [15]. Noise in the studied laboratory space is a very specific kind of noise. It does not exactly concern exceeded acoustic pressure levels, but rather the occurrence of undesired, distracting sounds.

In laboratory workspace, the greatest importance is placed on ensuring that the permissible noise levels are not exceeded. Analyses by various authors demonstrated that exceeded noise levels were indeed not found in the studied locations. Due to technological reasons, laboratory space is characterised by various kinds of noise (exhausts, ventilation/air conditioning) and sounds originating from apparatus and equipment. The perceived sound level for broadband noise differs from the perception of simple tone volume. Comparing the volume of a tone with the frequency of 1000 Hz with the loudness of white noise demonstrated [16] that the loudness of noise is always greater than that of the tone. For quiet sounds of about 30 dB SPL, white noise produces a slightly greater impression of loudness compared to a simple tone of the same intensity. For medium levels of 50÷60 dB SPL, white noise is perceived to be twice as loud as the simple tone, whereas at about 90 dB the loudness of the noise is about 1.5 times greater than that of the simple tone [16]. For this reason, the laboratory soundscape is often unfavourable, despite the lack of exceeded  $L_{Aeq}$ . Furthermore, due to the operation of extractors, air conditioning, fans, etc. laboratory space may exhibit low-frequency noise. The discomfort related to this kind of sound is associated with a number of subjective effects accompanying the exposure to such noise: fatigue, irritation, anxiety, headaches or heavy-headedness, the feeling of throbbing or pressure on the tympanum, nausea or vertigo [17]. Persons exposed to low-frequency noise exhibit significant differences in individual reactions. Some persons subjected to his kind of noise complain of irritation, anxiety and stress, whereas others report a feeling of excessive drowsiness and fatigue (which is more common) [11].

Decreasing the level of acoustic pressure in the workspace is not always possible, for technological reasons. Soundscape perception is influenced not only by acoustic but also extra-acoustic factors. One of the methods for improving the perception of the environment is to enable its modification, even to a minor extent, by the workers themselves. The workers may attain an impression of control over the environment through measures such as the customisation of personal workspace by changing the external or internal appearance of rooms [1].

An unfavourable soundscape in laboratory space may result in concentration deficiencies, reduced worker alertness and decreased work efficiency. Concentration-demanding mental work, data gathering or analytical processes appear particularly vulnerable to the influence of unfavourable soundscapes [10]. Tasks that require intense concentration are more susceptible to noise than routine tasks [6]. On the other hand, the workers are accustomed to the surrounding sounds, and an environment completely devoid of sound would surely turn out disturbing [4].

The purpose of these studies was to investigate the influence of individual types of rooms on the soundscape assessment of employees in their workspace. Another goal was also to identify the most irritating sounds in given types of rooms and indicate the possibility of improving unfavourable soundscapes in selected parts of the laboratory space.

## 3.2. Method and results

For the purposes of these studies, measurements in selected environmental monitoring laboratories in a scientific institute were carried out as well as control measurements in six offices in the same institution. The measurements were conducted over the periods of June–October 2020 and February–March 2021.

The studies encompassed:

- conducting objective measurements by means of the SVAN 945 noise meter,
- conducting a subjective soundscape assessment.

The first stage of the studies consisted of measurements for the purpose of determining the average acoustic pressure level  $L_{Aeq}$  as well as its minimum and maximum values in the studied laboratories. The second stage entailed the conduction of surveys among the laboratory staff, concerning their soundscape assessment, and the subsequent interpretation of the results.

### 3.2.1. First stage of studies

The first stage of studies encompassed objective measurements.

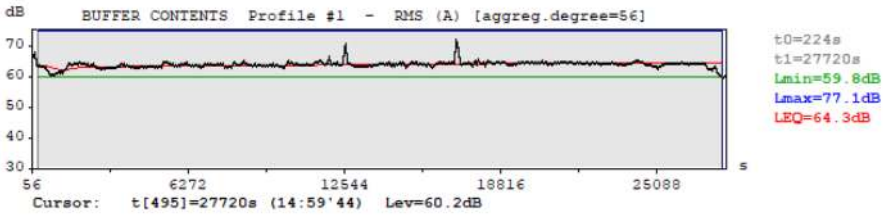
The studies were conducted using the SVAN 945 noise meter. The instrument was placed on a 1.5 m high stand. The instrument was situated by the employee workspaces. Before commencing the studies, the workers were informed that the instrument would not record conversations. The sound recording option was disregarded during the acoustic pressure level measurements. The studies were conducted continuously, with 8 hour long measurements. The obtained values were averaged for the entire work day.

The objective studies indicated differences in both sound levels and sound variation over time in different parts of the laboratory space.

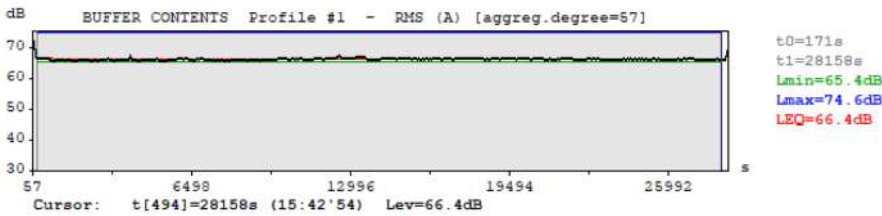
Afterwards, comparative sound measurements were conducted in office space.

Figures 3.1–3.4 present courses over time in selected laboratories. The average acoustic pressure level  $L_{Aeq}$  in all the laboratories did not exceed the permissible standard of 85 dBA for 8 hours of work. In the loudest room (Fig. 3.2), other sounds were masked by the pump operation. Relatively high minimum values were recorded for all the rooms, as a result of the constant equipment operation.

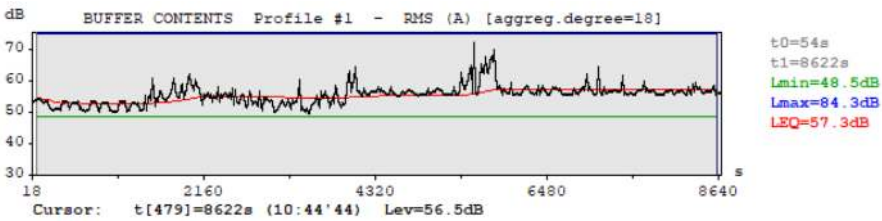
Figures 3.5–3.6 present courses over time in selected offices. One person worked in the office in Fig. 3.5, but the room provided a connection to another office with two other persons working therein. Employees passed through the room often. The room whose course over time is depicted in Fig. 3.6 was a self-contained office with one person working inside.



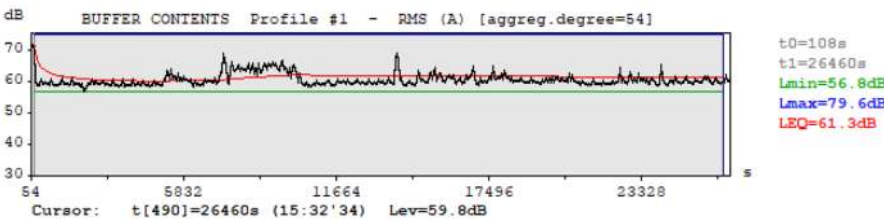
**Fig. 3.1.** Course over time in a room with operating analysers, coolers and ventilation



**Fig. 3.2.** Course over time in a room with operating pumps



**Fig. 3.3.** Course over time in a room with an operating compressor, refrigeration units and spectrometers



**Fig. 3.4.** Course over time in a room with two operating chromatographs, a cooler and ventilation

### 3.2.2. Second stage of studies

The second stage of studies encompassed a subjective laboratory space soundscape assessment. This assessment presents the perception of sounds in selected rooms by the workers. The studies were performed according to standard ISO/TS 12913–2 [9], using surveys to conduct the soundscape assessment.

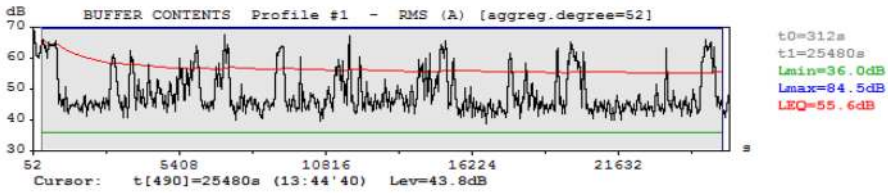


Fig. 3.5. Course over time in a connecting office room

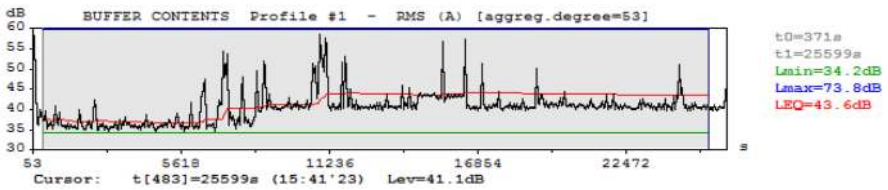


Fig. 3.6. Course over time in an office where one person worked at a computer and answered phone calls

The questions in the survey concerned the subjective perception of loudness, the sound sources in the room and the level of irritation in response to individual sounds.

The surveys were conducted among both the laboratory staff and the office personnel.

The surveys indicated that, unlike the employees in the office space (Fig. 3.7), the laboratory workers paid no attention to the sounds entering the rooms from the outside and the sounds generated by the presence of other coworkers. In the case of laboratory space, the sources of discomfort included the operation of machines, apparatus and equipment (Fig. 3.8). The laboratory workers participating in the survey were also unable to name pleasant sound sources in the rooms.

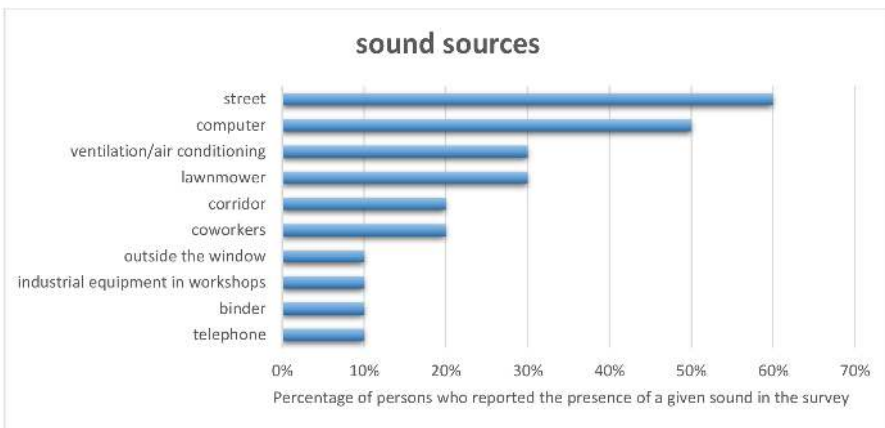
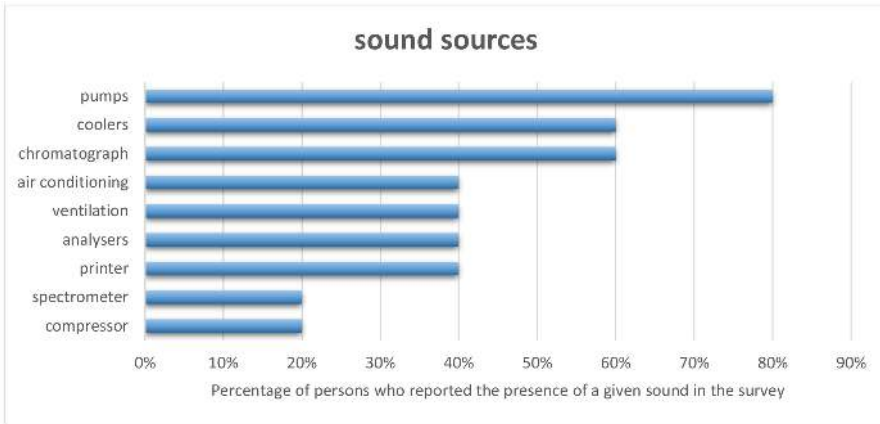


Fig. 3.7. Sound sources indicated by office workers



**Fig. 3.8.** Sound sources indicated by laboratory workers

According to the workers, the pump room was characterised by the greatest perceived discomfort. Although the room did not exhibit exceeded noise levels, as per the applicable legal regulation [19], the workers complained that the pump noise made it impossible to perform mental work in the room for an extended period of time. They also remarked that the room was not suitable for 8 hours of work.

The workers commented on the unfavourable soundscape in the surveys:

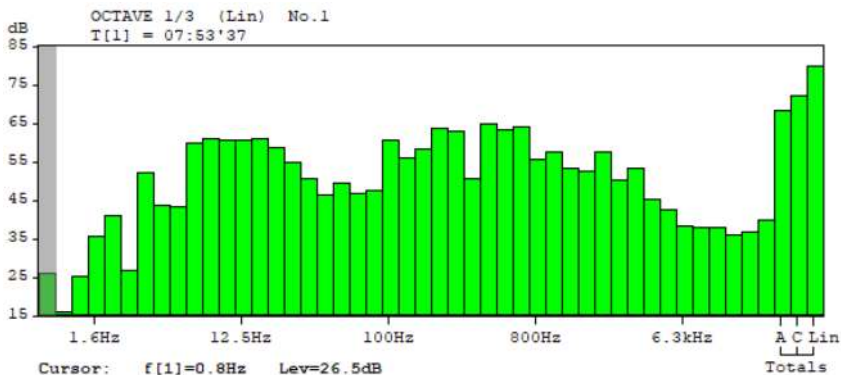
- “The sound is monotone, but irritating.”
- “I can hear a uniform noise.”

Some workers managed to adapt to the sound in the laboratory:

- “I don’t hear it if I stay here longer and divert my attention.”

Furthermore, the influence of a large number of low-frequency components in the laboratories may have contributed to the discomfort compared to the office space in the same building.

The average acoustic pressure level in a laboratory (Fig. 3.9) was 66.4 dBA, and the values ranged from a minimum of 65.4 dBA to a maximum of 74.6 dBA.



**Fig. 3.9.** Sound spectrum in a laboratory



The average acoustic pressure level in an office (Fig. 3.10) was 59.7 dBA, and the values ranged from a minimum of 43.4 dBA to a maximum of 84.1 dBA. In the case of the laboratory, the obtained results included considerably more low-frequency components, originating from the pump operation.

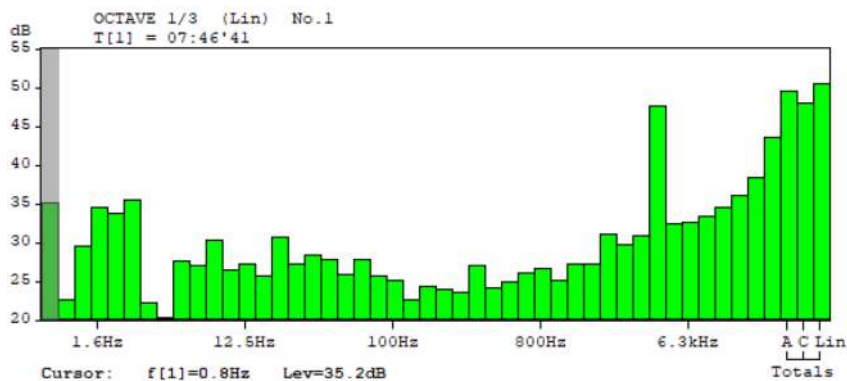


Fig. 3.10. Sound spectrum in an office

### 3.3. Discussion

Employers devote particular attention to provide the appropriate acoustic environment in office space for conceptual work and tasks that require concentration. However, laboratory work also requires concentration and care. Although the permissible sound values in a workspace (including laboratories) are determined by the applicable legal regulations, an unfavourable soundscape in a room may hinder the performance of efficient work. Therefore it should be required to identify the sources of sounds characterised by the greatest discomfort in such a type of acoustically-uncomfortable environment.

The sound sources in laboratories include apparatus, equipment and technical procedures. What is interesting is that the workers in these spaces did not mention other sound sources in the surveys, such as computers, individuals entering and leaving the rooms, or sounds coming in from the corridor. A uniform noise was the most commonly reported nuisance. The sources of noise included pumps, coolers and ventilation. The workers also mentioned the squeaks and sounds of the apparatus. They remarked that these sounds were tiresome and led to fatigue. One of the survey participants reported a feeling of satisfaction when the source of the noise changed, as it eliminated the feeling of monotony. The laboratory workers also named the presence of other sounds in the surveys, such as “squeaks” or “beeps”, but these were not considered uncomfortable.

Laboratories exhibiting greater differences between the minimum and maximum acoustic pressure levels were assessed more positively than those where the sound level was stable over time. Apart from one laboratory, the workers also reported no complaints regarding the sound level itself. The borderline in this case was a room where the average acoustic pressure level was 66.4 dBA, at a minimum value of 65.4 dBA. The employees remarked that they were incapable of working at such a sound level for a long time.

If the sound levels in laboratories are not exceeded, the employer is not obliged to take any action to limit the sound level. However, an unfavourable soundscape has an influence on the work comfort and may also contribute to the occurrence of mistakes resulting from fatigue or irritation. A common solution for improving the acoustic environment is to provide an additional sound source with the purpose of

masking the unpleasant sounds. Given the relatively high sound level in the studied laboratories, the masking sounds would need to be loud, which would further increase the average  $L_{Aeq}$  – this method was therefore disregarded, and other solutions were proposed. The proposed methods include technical solutions, employee rotation and allowing the voluntary use of hearing protection. These solutions may be used in situations where the sources of unfavourable soundscapes cannot be eliminated.

- technical solutions
  - transferring the pumps to a separate, isolated area,
  - covering the pumps with acoustic materials, sound baffles,
- limiting worker presence in a room to the time needed to accomplish the necessary tasks,
- voluntary use of hearing protection by the workers,
- if possible for technological reasons, limiting the number of apparatus active at the same time.

It is also important to inform the personnel about the lack of exceeded noise levels in the workspace, as it results in lower anxiety and stress.

## Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland (Statutory activity no. 11134010–171).

## Bibliography

- [1] V. L. Allen, D. B. Greenberger, *Destruction and perceived control*, in: A. Baum, J. E. Singer (Eds.), *Advances in environmental psychology*, Vol. 2: Applications of personal control, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 1980.
- [2] L. M. Anderson, B. E. Mulligan, L. S. Goodman, H. Z. Regen, *Effects of Sounds on Preferences for Outdoor Settings*, *Environment and Behaviour*, 15 (5), 539–566, 1983.
- [3] A. L. Brown, J. Kang, T. Gjestland, *Towards standardization in soundscape preference assessment* *Applied Acoustics*, 72 (6), 387–392, 2011.
- [4] J. L. Carles, I. López Barrio, J. V. de Lucio, *Sound influence on landscape values*, *Landscape and Urban Planning*, 43, 191–200, 1999.
- [5] D. Dubois, C. Guastavino, M. Raimbault, *A Cognitive Approach to Urban Soundscapes: Using Verbal Data to Access Everyday Life Auditory Categories*, *Acta Acustica United With Acustica*, 92, 865–874, 2006.
- [6] R. Golmohammadi, M. Aliabadi, T. Nezami, *An Experimental Study of Acoustic Comfort in Open Space Banks Based on Speech Intelligibility and Noise Annoyance Measures*, *Archives Of Acoustics*, 42 (2), 333–347, 2017.
- [7] K. Herranz-Pascual, I. Aspuru, I. Garcia, *Proposed conceptual model of environmental experience as framework to study the soundscape*, in: 0. IACIO (Ed.), *Inter Noise 2010: Noise and Sustainability*, Lisbon, Portugal, Portuguese Acoustical Society, Paper IN10\_445, 2010.
- [8] ISO 12913–1:2014 Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual frame work.
- [9] ISO/TS 13913–2 Acoustics – Soundscape – Part 2: Data collection and reporting requirements.
- [10] A. Kaczmarek, D. Augustyńska, W. Mikulski, *Hałas w pomieszczeniach biurowych – metody ograniczania*, *Bezpieczeństwo Pracy*, 10, 2004.
- [11] A. Kaczmarek, A. Łuczak, A. Sobolewski, *Uciążliwość hałasu niskoczęstotliwościowego podczas wykonywania prac wymagających uwagi – badania w warunkach laboratoryjnych*, *Bezpieczeństwo Pracy*, 6, 2006.

- 
- [12] J. Kang, *Urban Sound Environment*, Taylor & Francis, London, 2007.
- [13] J. Kang, F. Aletta, T. Gjestland, L. A. Brown, D. Botteldooren, B. Schulte–Fortkamp, P. Lercher, I. van Kamp, K. Genuit, A. Fiebig, J. L. Bento Coelho, L. Maffei, L. Lavia, *Ten questions on the soundscapes of the built environment*, *Building and Environment* 108, 284–294, 2016.
- [14] O. Medvedev, D. Shepherd, M. J. Hautus, *The restorative potential of soundscapes: A physiological investigation*, *Applied Acoustics*, 96, 20–26, 2015.
- [15] B. C. J. Moore, *Introduction to the Psychology of Hearing*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań, 1999.
- [16] E. Ozimek, *Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań, 2002.
- [17] K. Persson–Waye, *On the Effects of Environmental Low Frequency Noise* (doctoral dissertation), Gothenburg University, Sweden, 1995.
- [18] M. Raimbault, D. Dubois, *Urban soundscapes: Experiences and knowledge*, *Cities*, 22 (5), 339–350, 2005.
- [19] Regulation of the Minister of Family, Labour and Social Policy of 12 June 2018, concerning the maximum permissible concentrations and intensities of health risk factors in the workspace (Dz. U. of 2018, item 1286 as amended).
- [20] B. Schulte–Fortkamp, B. M. Brooks, W. R. Bray, *Soundscape: An Approach to Rely on Human Perception and Expertise in the Post–Modern Community Noise Era*, *Acoustics Today*, 3 (1), January, 2007.
- [21] M. Shafer, *The Soundscape. Our Sonic Environment and Turning The World*, Destiny Books, Rochester, Vermont, 1977.



## Rozdział 4

# Badania pilotażowe uciążliwości hałasu w odniesieniu do charakterystyk czasowych, amplitudowych i częstotliwościowych dźwięku

Jan Radosz

*Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy*

e-mail: [jarad@ciop.pl](mailto:jarad@ciop.pl)

Celem badań pilotażowych była ocena uciążliwości hałasu w odniesieniu do charakterystyk czasowych, amplitudowych i częstotliwościowych dźwięku w reprezentatywnym środowisku biurowym. W metodzie badawczej zastosowano test ALS z Wiedeńskiego Systemu Testów. Na stanowisku badawczym skompletowano zestaw niezbędnej aparatury pomiarowej i diagnostycznej oraz opracowano 3 wirtualne środowiska biurowe o stałym poziomie dźwięku 55 dB – środowisko B (rozmowy), środowisko C (urządzenia biurowe), środowisko D (wszystkie źródła hałasu łącznie). Jako referencyjne przyjęto środowisko A – ciche pomieszczenie biurowe bez dodatkowych źródeł hałasu. W celu odwzorowania środowisk akustycznych zarejestrowano 14 typowych źródeł hałasu biurowego pochodzącego, m.in. od dzwoniących telefonów, rozmów pracowników, drukarek czy komputerów. Zostały one przeniesione do wirtualnego środowiska dźwiękowego 3D oraz przekonwertowane do dźwięku w technice binauralnej. Dla każdego źródła hałasu wyznaczono również parametry psychoakustyczne ich odbioru. Podczas ekspozycji na każde z wymienionych środowisk akustycznych badane osoby wykonywały test ALS (test wydajności pracy), a następnie oceniały dane środowisko za pomocą kwestionariusza. Kolejność prezentacji środowisk akustycznych była oparta na planie kwadratu łacińskiego, aby wykluczyć wpływ kolejności badań na wyniki oceny. Analiza statystyczna wyników badań nie wykazała istotnego statystycznie zróżnicowania między średnimi wartościami dla różnych środowisk w teście ALS, zarówno w kontekście liczby wykonanych obliczeń, jak i w procencie błędów. Subiektywne odczucia badanych osób nie znalazły odzwierciedlenia w wynikach testów psychologicznych.

### 4.1. Wprowadzenie

Hałas to każdy niepożądany dźwięk, który może być uciążliwy albo szkodliwy dla zdrowia lub zwiększać ryzyko wypadku przy pracy. Hałas, poza oddziaływaniem narząd słuchu, jako stresor może przyczyniać się do rozwoju różnego typu chorób (np. choroby nadciśnieniowej, choroby wrzodowej,

nerwic), powodować rozproszenie uwagi, utrudniać pracę i zmniejszać jej wydajność [1]. Zgodnie z definicją ISO/TS 15666 [2] uciążliwość wynikająca z ekspozycji na hałas jest indywidualną, niekorzystną reakcją osoby wpływającą na niezadowolenie, niepokój, zirytowanie, zakłócenie spokoju. Światowa Organizacja Zdrowia wiąże uciążliwość hałasu z niekorzystnym wpływem na zdrowie i definiuje jako doświadczenie wielu różnych reakcji, takich jak gniew, rozczarowanie, niezadowolenie, wycofanie, bezradność, depresja, lęki, rozproszenie uwagi, wyczerpanie [3].

Hałas jest jednym z głównych czynników uciążliwych w pomieszczeniach typu "open space" i w innych otwartych przestrzeniach pracy, gdzie występuje wiele źródeł hałasu. Liczne badania laboratoryjne wykazały, że hałas na stanowiskach pracy umysłowej ma zakłócający wpływ na funkcje poznawcze, takie jak arytmetykę mentalną, naukę powiązanych słów lub tekstu, zliczanie wyświetlanych informacji wizualnych oraz rozumienie tekstu i zapamiętywanie [4]– [10]. Hałas w miejscu pracy wydaje się również wpływać na zdrowie fizyczne i psychiczne [11]. W wielu pracach podkreśla się znaczenie wpływu hałasu na zdrowie, porównując deklarowany stan zdrowia osób pracujących w pomieszczeniach "open space" i osób pracujących w pomieszczeniach prywatnych. Okazało się, że odsetek osób narzekających na hałas był 10 razy większy w pomieszczeniach "open space" niż w pomieszczeniach prywatnych. To samo badanie wykazało związek między rodzajem pomieszczenia a objawami takimi jak ból głowy, zmęczenie czy trudności w koncentracji.

Na stanowiskach pracy w pomieszczeniach administracyjnych, biur projektowych, do prac teoretycznych, opracowania danych i innych o podobnym przeznaczeniu występuje wiele źródeł hałasu – dzwoniące telefony, osoby rozmawiające przez telefon, osoby rozmawiające ze sobą, klawiatury komputerowe, sprzęt biurowy (drukarki, kopiarki, skanery itp.), hałas komunikacyjny z zewnątrz, systemy wentylacji lub klimatyzacji, itp. Nie wszystkie z tych źródeł postrzegane są w ten sam sposób i nie mają takiego samego wpływu na odczuwaną uciążliwość. W literaturze można znaleźć wiele wyników badań dotyczących wpływu różnego rodzaju sygnałów dźwiękowych na wydajność badanych osób, w tym sprawność wykonywanych zadań. Zadania te z reguły obejmują zapamiętywanie liczb, zapamiętywanie słów, krzyżówki, operacje matematyczne, łamigłówki, np. Sudoku itp. Nie podjęto dotychczas próby obiektywnej parametryzacji hałasu w środowisku pracy w celu wyznaczenia modeli dawka-odpowiedź oraz opracowania kryteriów uciążliwości.

W zakresie metod pomiarowych oraz dopuszczalnych poziomów hałasu na stanowiskach pracy obowiązujące w Polsce rozporządzenia i normy [12] opierają się jedynie na równoważnym poziomie ciśnienia akustycznego i nie uwzględniają innych charakterystyk czasowych, amplitudowych oraz częstotliwościowych dźwięku (tab. 4.1).

Ostatnie doniesienia literaturowe [19] wskazują na potrzebę opracowania kryteriów uciążliwości hałasu, niemniej jednak wyniki dotychczasowych badań nie są wystarczające do ustanowienia takich kryteriów. Dlatego też podjęto pilotażowe prace badawcze dotyczące kryteriów uciążliwości hałasu ze względu na możliwość realizacji przez pracownika jego podstawowych zadań na podstawie różnych charakterystyk czasowych, amplitudowych oraz częstotliwościowych dźwięku, w tym określenie odpowiednich poprawek w odniesieniu do wartości dopuszczalnych hałasu ze względu na możliwość realizacji przez pracownika jego podstawowych zadań.

## 4.2. Materiał i metody

W badaniach pilotażowych w doborze próby zastosowano metodę doboru przypadkowego z uwagi na to, że głównym celem badań pilotażowych było zweryfikowanie metody badawczej. W badaniach właściwych planowanych w II etapie zadania będzie wykorzystana metoda doboru nielosowego polegająca na ustaleniu z góry pewnych charakterystyk (m.in. wiek, wykształcenie, stan zdrowia, itp.), jakim mają odpowiadać poszczególne jednostki w próbie. Struktura próby w tym przypadku będzie formowana

w sposób arbitralny. W badaniach planowany jest udział minimum 60 osób (dwie równe grupy kobiet i mężczyzn).

**Tabela 4.1**

Dopuszczalne wartości hałasu ze względu na możliwość realizacji przez pracownika jego podstawowych zadań wg PN-N-01307:1994 [12]

| L.p. | Stanowisko pracy   | Równoważny poziom dźwięku A w czasie pobytu pracownika na stanowisku pracy<br>$L_{Aeq,T_e}$ [dB] |
|------|--|--|
| 1.   | W kabinach bezpośredniego sterowania bez łączności telefonicznej, w laboratoriach ze źródłami hałasu, w pomieszczeniach z maszynami i urządzeniami liczącymi, maszynami do pisania, dalekopisami i w innych pomieszczeniach o podobnym przeznaczeniu | 75   |
| 2.   | W kabinach dyspozytorskich, obserwacyjnych i zdalnego sterowania z łącznością telefoniczną używaną w procesie sterowania, w pomieszczeniach do wykonywania prac precyzyjnych i w innych pomieszczeniach o podobnym przeznaczeniu                     | 65   |
| 3.   | W pomieszczeniach administracyjnych, biur projektowych, do prac teoretycznych, opracowywania danych i innych o podobnym przeznaczeniu  | 55   |

Założono, że aby osiągnąć planowany cel w badaniach pilotażowych będzie uczestniczyło 10 osób (7 mężczyzn oraz 3 kobiety). Dla każdej z badanych osób na wstępie przeprowadzono badania słuchu (audiometria tonalna). Za próg kwalifikacji do badań przyjęto zakres 0 – 20 dB HL (przedział słuchu normalnego).

Przed przystąpieniem do badań każda z osób została poproszona o wypełnienie kwestionariusza wrażliwości na hałas. Do tego celu zastosowano zredukowany i zwalidowany kwestionariusz (NoiSeQ) opracowany przez Schutte'a [13] (tab. 4.2).

Każda z badanych osób została zapoznana z przebiegiem badania, otrzymała odpowiednie instrukcje wykonania zadań oraz otrzymała do podpisu formularz świadomej zgody udziału w badaniach.

Główna część badania składała się z czterech części podzielonych ze względu na generowany sygnał testowy. W każdej części badane osoby wykonywały określone zadania na komputerze (testy psychologiczne) a następnie dokonywały oceny sygnałów testowych za pomocą kwestionariusza (tab. 4.3) zawierającego:

- ocenę uciążliwości środowiska akustycznego (skala werbalna ISO 15666 [2]),
- ocenę trudności i obciążenia w czasie wykonywania zadań (zredukowany kwestionariusz NASA Task Load Index).

Do badań zastosowano Wiedeński System Testów w języku polskim oraz wybrano test wydajności pracy ALS do oceny wydajności badanych osób w warunkach ekspozycji na zróżnicowane wirtualne środowiska akustyczne.

Tabela 4.2

Kwestionariusz wrażliwości na hałas zastosowany w badaniach pilotażowych

|    |  | TAK | RACZEJ<br>TAK | RACZEJ<br>NIE | NIE |
|----|--|-----|---------------|---------------|-----|
| 1  | Potrzebuję absolutnej ciszy aby dobrze spać w nocy                                     | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 2  | Potrzebuję cichego otoczenia aby pracować nad nowymi zadaniami                         | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 3  | Kiedy jestem w domu szybko przyzwyczajam się do pantującego hałasu                     | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 4  | Staję się bardzo zdenerwowany kiedy słyszę jak ktoś rozmawia podczas gdy próbuję usnąć | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 5  | Jestem bardzo wrażliwy na hałasy z sąsiedztwa  | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 6  | Kiedy ludzie wokół mnie są głośno nie mogę skupić się na pracy                         | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 7  | Jestem wrażliwy na hałas   | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 8  | Moja wydajność jest znacznie niższa w głośnym otoczeniu                                | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 9  | Nie czuję się dobrze wypoczęty jeśli poprzednia noc była hałaśliwa                     | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 10 | Nie przeszkadza mi mieszkanie przy głośnej ulicy                                       | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 11 | Dla cichego miejsca zamieszkania jestem w stanie zaakceptować inne niegodności         | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 12 | Potrzebuję ciszy i spokoju do wykonania trudnych zadań                                 | 1   | 2             | 3             | 4   |
| 13 | Mogę zasnąć mimo występującego hałasu  | 1   | 2             | 3             | 4   |

Scenariusz badań obejmował cztery rodzaje wirtualnych środowisk akustycznych o zamiennych charakterystykach czasowych, amplitudowych i częstotliwościowych dźwięku. Podczas ekspozycji na każdy z sygnałów testowych badane osoby wykonywały test ALS a następnie oceniały dane środowisko za pomocą kwestionariusza. Kolejność prezentacji środowisk akustycznych była oparta na planie kwadratu łacińskiego, aby wykluczyć wpływ kolejności na wyniki oceny. Czas pełnego badania dla jednego uczestnika wynosił ok. 2 godzin.

Na potrzeby badań opracowano cztery rodzaje wirtualnych środowisk akustycznych:

- Środowisko A – ciche pomieszczenie biurowe (komputer, klimatyzacja);
- Środowisko B – źródła hałasu biurowego (komputer, klimatyzacja, drukarki, komputery, telefony, klawiatury komputerowe);
- Środowisko C – źródła hałasu biurowego (komputer, klimatyzacja, rozmowy o umiarkowanej zrozumiałości mowy);
- Środowisko D – źródła hałasu biurowego (komputer, klimatyzacja, rozmowy o umiarkowanej zrozumiałości mowy, drukarki, komputery, telefony, klawiatury komputerowe, przemieszczanie się osób).

Parametry psychoakustyczne opracowanych środowisk akustycznych podano w tab. 4.4.

Pierwszym założeniem opracowanych środowisk akustycznych od B do D było, aby dla każdego z nich równoważny poziom dźwięku A wynosił 55 dB (kryterium uciążliwości hałasu na stanowisku pracy zgodnie z PN-N-01307:1994 [12]). Drugim założeniem było opracowanie środowisk akustycz-



nych zróżnicowanych pod względem zastosowanych źródeł hałasu oraz wartości parametrów psychoakustycznych.

**Tabela 4.3**  
Kwestionariusz oceny sygnałów testowych

| Kwestionariusz oceny   |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
|--|---|---|---|---|-------------------|---|-------|---|---|----|
| Kod badanej osoby:   |   |   |   |   |                   |   | Data: |   |   |    |
| Środowisko akustyczne:   |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
| <b>Jak Pan/Pani ocenia uciążliwość hałasu podczas badania:</b>   |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• W ogóle nie uciążliwy</li> <li>• Lekko uciążliwy</li> <li>• Umiarkowanie uciążliwy</li> <li>• Bardzo uciążliwy</li> <li>• Ekstremalnie uciążliwy</li> </ul> |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
| <b>Jak bardzo wymagające umyślowo Pani/Pana zdaniem były wykonywane zadania w badanych warunkach?</b>  |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
| 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5                 | 6 | 7     | 8 | 9 | 10 |
| Nie wymagające   |   |   |   |   | Bardzo wymagające |   |       |   |   |    |
| <b>Jak głośny Pani/Pana zdaniem był hałas?</b>   |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
| 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5                 | 6 | 7     | 8 | 9 | 10 |
| Bardzo cichy   |   |   |   |   | Bardzo głośny     |   |       |   |   |    |
| <b>Jak trudno Pani/Pana zdaniem było wykonać zadania w badanych warunkach?</b>   |   |   |   |   |                   |   |       |   |   |    |
| 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5                 | 6 | 7     | 8 | 9 | 10 |
| Bardzo łatwo   |   |   |   |   | Bardzo trudno     |   |       |   |   |    |

**Tabela 4.4**  
Parametry akustyczne środowisk zastosowanych do badań pilotażowych

| Środowisko akustyczne | Głośność ISO 532-2 2017 (C/PB) (sone) | Ostrość - Aures, ISO 532-1 2017 (acum) | Siła fluktuacji ISO 532-1 2017 (vacil) | Chropowatość ISO 532-1 2017 (asper) | Poziom dźwięku A (dB) |
|-----------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-----------------------|
| <b>A</b>              | -                                     | -                                      | -                                      | -                                   | 24,2                  |
| <b>B</b>              | 58,5                                  | 1,37                                   | 0,65                                   | 1,33                                | 55                    |
| <b>C</b>              | 55,7                                  | 2,69                                   | 0,73                                   | 1,04                                | 55                    |
| <b>D</b>              | 57,5                                  | 2,33                                   | 0,82                                   | 1,55                                | 55                    |

Do stworzenia środowisk akustycznych wybrano najbardziej uciążliwe źródła hałasu biurowego (tab. 4.5).

**Tabela 4.5**

Źródła hałasu biurowego oraz ocena wpływu na koncentrację na podstawie badań ankietowych [20]

| Źródło hałasu                   | *Średnia ocena (SD) |
|---------------------------------|---------------------|
| Źródła hałasu łącznie           | 3,60 (0,32)         |
| Dzwoniący telefon               | 3,73 (0,71)         |
| Dzwoniący, nieodbierany telefon | 4,33 (0,74)         |
| Drukarki                        | 3,45 (0,68)         |
| Klawiatury komputerowe          | 3,10 (0,48)         |
| Komputery                       | 3,24 (0,43)         |
| Hałas z zewnątrz                | 3,06 (0,49)         |
| Rozmowy                         | 3,99 (0,67)         |
| Rozmowy przez telefon           | 3,82 (0,74)         |
| Poruszające się osoby           | 3,58 (0,67)         |

\*(1 = znaczna poprawa / 5 = poważne pogorszenie koncentracji)

Zarejestrowane rzeczywiste źródła hałasu (tab. 4.6) zostały przeniesione do wirtualnego środowiska dźwiękowego 3D oraz przekonwertowane do dźwięku w technice binauralnej, który następnie odtwarzany był na słuchawkach AKG K245. Do tego celu wykorzystano oprogramowanie dearVR PRO.

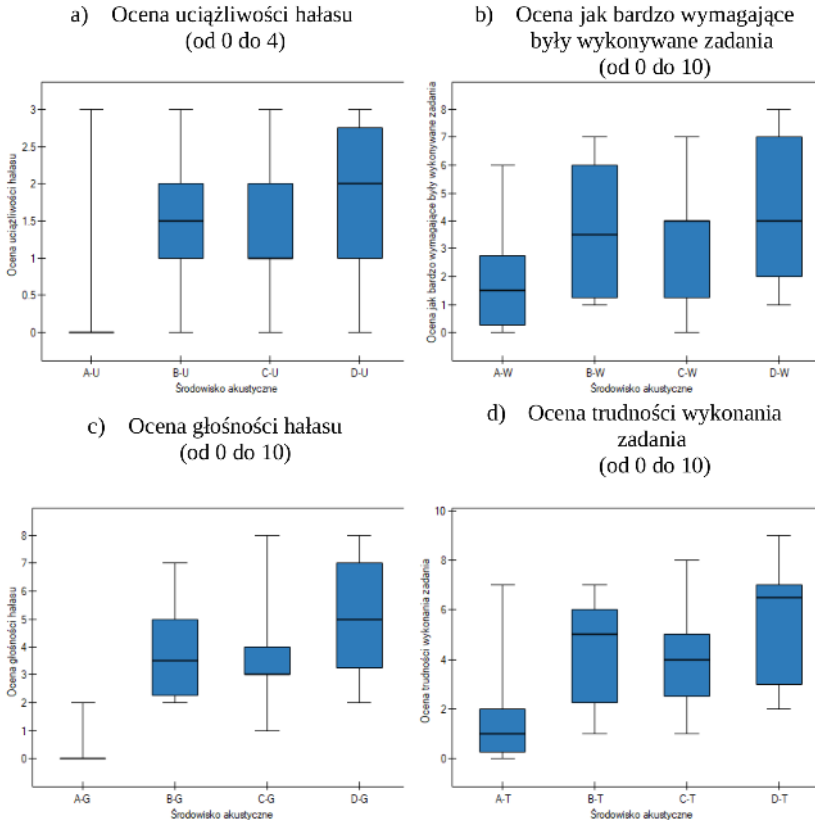
**Tabela 4.6**

Parametry psychoakustyczne poszczególnych źródeł hałasu zastosowanych do badań pilotażowych

| Nr | Źródło hałasu            | Siła fluktuacji ISO 532-1<br>2017 (vacil) | Głośność ISO 532-2 2017<br>(CPB) (sone) | Chropowatość ISO 532-1<br>2017 (asper) | Ostrość - Aures, ISO 532-1<br>2017 (acum) | Środowisko akustyczne |
|----|--------------------------|---|---|--|---|-----------------------|
| 1  | Telefon stacjonarny 1    | 0,9836                                    | 17,77                                   | 3,175                                  | 3,249                                     | C,D                   |
| 2  | Telefon komórkowy 1      | 1,223                                     | 29,58                                   | 1,064                                  | 5,226                                     | C,D                   |
| 3  | Telefon stacjonarny 2    | 0,8776                                    | 15,54                                   | 1,548                                  | 3,606                                     | C,D                   |
| 4  | Telefon komórkowy 2      | 2,933                                     | 10,31                                   | 2,036                                  | 2,635                                     | C,D                   |
| 5  | Rozmowy w tle 1          | 1,25                                      | 6,81                                    | 1,386                                  | 1,567                                     | B,D                   |
| 6  | Rozmowy w tle 2          | 1,597                                     | 22,91                                   | 1,012                                  | 2,04                                      | B,D                   |
| 7  | Rozmowa osoba 1          | 1,703                                     | 12,01                                   | 5,195                                  | 2,005                                     | B,D                   |
| 8  | Rozmowa osoba 2          | 1,617                                     | 14,72                                   | 7,934                                  | 2,198                                     | B,D                   |
| 9  | Odgłos kroków            | 2,66                                      | 9,448                                   | 2,362                                  | 2,125                                     | D                     |
| 10 | Drukarka atramentowa     | 2,037                                     | 16,94                                   | 2,332                                  | 3,124                                     | C,D                   |
| 11 | Drukarka laserowa        | 1,11                                      | 8,414                                   | 1,741                                  | 2,589                                     | C,D                   |
| 12 | Kserokopiarka            | 2,599                                     | 5,907                                   | 2,138                                  | 2,218                                     | C,D                   |
| 13 | Klawiatura komputerowa 1 | 1,377                                     | 15,52                                   | 3,056                                  | 3,151                                     | C,D                   |
| 14 | Klawiatura komputerowa 2 | 1,587                                     | 8,041                                   | 1,681                                  | 3,164                                     | C,D                   |

### 4.3. Wyniki badań

Badane środowiska akustyczne były oceniane w zakresie od w ogóle nieuciążliwych (głównie środowisko A) do bardzo uciążliwych. Przeciętnie, środowiska B, C i D były oceniane jako umiarkowanie uciążliwe (rys. 4.1a).



**Rys. 4.1.** Wyniki badań kwestionariuszowych (mediany, kwartyle oraz wartości minimalne i maksymalne)

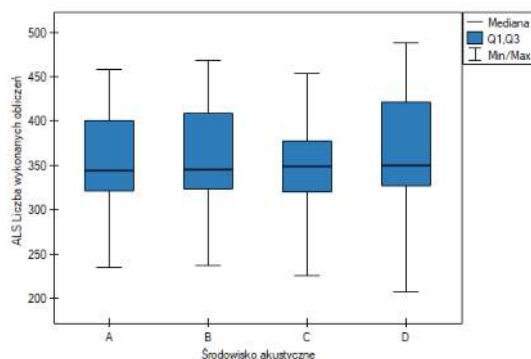
Wyniki subiektywnej oceny jak bardzo wymagające były wykonywane zadania zawierały się w zakresie od 0 do 8 (na skali oceny od 0 do 10). Mimo dużej rozpiętości poszczególnych ocen przeciętne wartości kształtowały się na podobnym poziomie dla środowisk B, C, i D (wartość oceny między 3 i 4). Ogólnie rzecz biorąc, można uznać, że dla badanych osób zadanie było umiarkowanie wymagające dla środowisk B, C i D i mało wymagające w przypadku środowiska A (rys. 4.1b).

Wyniki subiektywnej oceny głośności sygnału wykazały znaczną rozpiętość poszczególnych ocen (od 0 do 8 na skali oceny od 0 do 10). Przeciętne wartości oceny (od 3 do 4) wskazują na umiarkowaną głośność środowisk B, C i D (rys. 4.1c).

Wyniki subiektywnej oceny trudności wykonania zadania wykazały, podobnie jak w przypadku oceny głośności sygnałów, dużą rozpiętość poszczególnych ocen (od 0 do 9 na skali oceny od 0 do 10). Prze-

cięte wartości oceny wskazują natomiast na umiarkowaną trudność wykonania zadania w warunkach z hałasem (wartości oceny 4–5 dla sygnałów B i C oraz 6 dla środowiska D) (rys. 4.1d).

Zakres liczby wykonanych obliczeń w teście ALS (rys. 4.2) dla wszystkich środowisk wynosił od 207 do 488. Przeciętne wartości kształtowały się na poziomie od 348 do 359. Różnice przeciętnych między poszczególnymi środowiskami nie przekraczały 3%. Najmniejszą średnią liczbę wykonanych obliczeń zaobserwowano dla środowiska C, a największą dla środowiska D.



**Rys. 4.2.** Wyniki testu ALS – Liczba wykonanych obliczeń (mediany, kwartyle oraz wartości minimalne i maksymalne)

Do analizy wyników badań wykorzystano następujące testy statystyczne: test Shapiro-Wilka do oceny normalności rozkładu zmiennej, test Mauchly’ a do sprawdzenia założenia sferyczności, ANOVA dla grup zależnych (zmienna w skali interwałowej) oraz test ANOVA Friedmana (zmienna w skali porządkowej oraz zmienna przy braku spełnionego założenia o normalności rozkładu). Do analizy wykorzystano oprogramowanie Statistica 13 oraz PQStat 1.6.8. W analizie statystycznej przyjęto poziom istotności równy 0,05.

Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji dla powtarzanych pomiarów nie wykazały zróżnicowania istotnego statystycznie pomiędzy średnimi wartościami dla różnych środowisk w teście ALS (liczba wykonanych obliczeń). W przypadku kolejnego testu ALS (procent błędów) analiza wariancji powtarzanych pomiarów dla rang Friedmana (ANOVA Friedmana) nie wykazała zróżnicowania istotnego statystycznie pomiędzy wynikami testów w zależności od środowiska akustycznego.

## 4.4. Wnioski

Do badań pilotażowych zastosowano Wiedeński System Testów. Na stanowisku badawczym skompletowano zestaw niezbędnej aparatury pomiarowej i diagnostycznej oraz opracowano 3 wirtualne środowiska biurowe o zróżnicowanych parametrachpsychoakustycznych, ale o stałym poziomie dźwięku A wynoszącym 55 dB – środowisko B (rozmowy), środowisko C (urządzenia biurowe), środowisko D (wszystkie źródła hałasu łącznie). Jako referencyjne przyjęto środowisko A – ciche pomieszczenie biurowe bez dodatkowych źródeł hałasu.

Badane środowiska akustyczne były oceniane w zakresie od w ogóle nieuciążliwych do bardzo uciążliwych. Przeciętnie, środowiska, w których występował hałas biurowy – B, C i D były oceniane jako umiarkowanie uciążliwe.

Mimo dużej rozpiętości poszczególnych ocen przeciętne wartości subiektywnej oceny, jak bardzo wymagające były wykonywane zadania w badanych warunkach, kształtowały się na podobnym po-

mie dla środowisk B, C, i D. Ogólnie rzecz biorąc, można uznać, że dla badanych osób zadanie było umiarkowanie wymagające dla środowisk B, C i D i mało wymagające w przypadku środowiska A.

Wyniki subiektywnej oceny głośności sygnału wykazały znaczną rozpiętość poszczególnych ocen, niemniej jednak przeciętne wartości oceny wskazują na umiarkowaną głośność środowisk B, C i D.

Wyniki subiektywnej oceny trudności wykonania zadania wykazały, podobnie jak w przypadku oceny głośności sygnałów, dużą rozpiętość poszczególnych ocen, natomiast przeciętne wartości oceny wskazują na umiarkowaną trudność wykonania zadania w warunkach z hałasem (środowiska B, C i D).

Analiza statystyczna wyników badań nie wykazała zróżnicowania istotnego statystycznie pomiędzy średnimi wartościami dla różnych środowisk w teście ALS.

W przypadku badań kwestionariuszowych wykazano różnice istotne statystycznie pomiędzy środowiskiem bez dodatkowego hałasu (A) a pozostałymi środowiskami, w których występował hałas biurowy (B, C i D). Badane osoby wskazywały na większą uciążliwość hałasu oraz większą trudność wykonywania zadań.

Subiektywne odczucia badanych osób nie znalazły odzwierciedlenia w wynikach testów psychologicznych. Wykazane w analizie statystycznej braki zróżnicowania wyników badań pomiędzy poszczególnymi środowiskami nie dają przesłanek do różnicowania bodźców dźwiękowych w kontekście parametrów psychoakustycznych.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego “Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021–2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii.*

*Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy*

## Bibliografia

- [1] G. Belojevic, *Noise and performance: research in Central, Eastern and South-Eastern Europe and newly independent states*, *Noise Health*, 15, 2–5, 2013.
- [2] ISO/TS 15666:2003 *Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys 2003*.
- [3] C. Clark, K. Paunovic, *WHO environmental noise guidelines for the European Region: a systematic review on environmental noise and quality of life, wellbeing and mental health*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (11), 2400, 2018.
- [4] L. Fredianelli, S. Carpita, G. Licitra, *A procedure for deriving wind turbine noise limits by taking into account annoyance*, *Science of The Total Environment*, 648, 728–736, 2019.
- [5] C. Lechner, D. Schnaiter, S. Bose-O’Reilly, *Combined effects of aircraft, rail, and road traffic noise on total noise annoyance – a cross-sectional study in Innsbruck*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (18), 3504, 2019.
- [6] P. Maigrot, E. Parizet, C. Marquis-Favre, *Annoyance due to combined railway noise and vibration: Comparison and testing of results from the literature*, *Applied Acoustics*, 165, 107324, 2020.
- [7] W. Paszkowski, J. Kotus, T. Poremski, B. Kostek, *Evaluation of sound quality features on environmental noise effects – a case study applied to road traffic noise*, *Metrology and Measurement Systems*, 25, 517–531, 2018.
- [8] W. Paszkowski, M. Sobiech, *The modeling of the acoustic condition of urban environment using noise annoyance assessment*, *Environmental Modeling & Assessment*, 24, 319–330, 2019.
- [9] J. Ryu, H. Song, *Effect of building facade on indoor transportation noise annoyance in terms of frequency spectrum and expectation for sound insulation*, *Applied Acoustics*, 152, 21–30, 2019.

- [10] M. Sheikh, A. Mitchell, *Design strategies for perceived acoustic comfort in urban environments – A literature review*, Proceedings of ACOUSTICS 2018, Adelaide, Australia, 249–258, 2018.
- [11] P. Wallner, H.-P. Hutter, H. Moshhammer, *Evaluating an 80 Hz tonal noise from a hydropower plant*, International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 32 (3), 401–411, 2019.
- [12] E. Sundstrom, J. P. Town, R. W. Rice, D. P. Osborn, M. Brill, *Office noise, satisfaction, and performance*, Environment and Behavior, 26, 195–222, 1994.
- [13] E. M. De Croon, J. K. Sluiter, P. P. F. M. Kuijer, M. H. W. Frings-Dresen, *The effect of office concepts on worker health and performance: a systematic review of the literature*, Ergonomics, 48, 119–134, 2005.
- [14] A. Kaarlela-Tuomaala, R. Helenius, E. Keskinen, V. Hongisto, *Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices – longitudinal study during relocation*, Ergonomics, 52, 1423–1444, 2009.
- [15] S. Banbury, D. C. Berry, *Disruption of office-related tasks by speech and office noise*, British Journal of Psychology, 89, 499–517, 1998.
- [16] B. Smagowska, M. Pawlaczyk-Łuszczczyńska, *Effects of ultrasonic noise on the human body – a bibliographic review*, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 19, 195–202, 2013.
- [17] PN–N–01307:1994 Hałas – Dopuszczalne wartości parametrów hałasu w środowisku pracy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów, 1994.
- [18] M. Schutte, A. Marks, E. Wenning, B. Griefahn, *The development of the noise sensitivity questionnaire*, Noise & Health, 9, 15–24, 2007.
- [19] X.-F. Shi, Q.-H. Lin, J.-H. Kim, G.-Q. Di, *Optimization of noise control schemes based on improvement of annoyance*, Zhongguo Huanjing Kexue/China Environmental Science, 39 (1), 397–401, 2019.
- [20] S. P. Banbury, D.C. Berry, *Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvements*, Ergonomics, 48 (1), 25–37, 2005.

**Część II**

**AKUSTYKA ŚRODOWISKOWA  
I OCHRONA PRZED HAŁASEM**





## Rozdział 5

# Leaky Partial Updates in Application to Structural Active Noise Control

Dariusz Bismor

*Silesian University of Technology, Department of Measurements and Control Systems,  
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Poland*

e-mail: *Dariusz.Bismor@polsl.pl*

Structural active noise control (ANC) belongs to the group of most demanding algorithms, when it comes to computational power. One of the ways to lower this demand is to use algorithms with partial update of the coefficient vectors. Such algorithms are well known in signal processing, but their leaky versions were rarely reported. This paper fills this gap by showing how leaky partial updates can be applied to a structural ANC application, with the number of actuators higher than the number of error sensors.

## 5.1. Introduction

Noise is among one of major global health risks, affecting millions of people around the world [8]. Therefore, noise reduction methods are researched by many scientists from different countries. Recently, structural noise control achieved a lot of attention due to the fact that it allows to obtain a global noise reduction, hard to achieve by many different methods [7, 9]. Unfortunately, the structural ANC is one with the highest demands on the computational power, as structural ANC systems are frequently multichannel. For example, to control the sound propagating from a device with cuboid enclosure, one must apply control and observe the results on 3-5 walls, depending on the device placement (3 walls for a device standing in a corner, 4 walls for a device positioned close to a wall, and 5 otherwise). Thus, at least 3 error sensors and 3 actuators must be used, but it comes from many research reports that the number of actuators must be higher than one per wall to effectively control [9, 10]. Other publications show that it is impossible to disregard the coupling between control paths concerned with different walls (i.e. apply 3 independent, single-channel systems), as it usually results in an unstable operation.

Another important issue is the high computational demand imposed by ANC systems themselves. With a few exceptions, such systems are adaptive, and the adaptation mechanism requires resources as well as the filtration process. Moreover, feedforward ANC systems need a secondary path model, which is used to filter certain signals, depending on the selected algorithm. To conclude, ANC systems in general, and the structural ANC systems in particular are the systems with very high (and still increasing) computational demands, and even modern hardware fails to fulfill these demands. Therefore,

various techniques to lower the computational demand are searched for when it comes to real-world implementation of the structural ANC system [6].

Partial updates (PU), or more precisely: partial parameter updates, is a technique that can be used for the purpose mentioned above. With this technique, only a certain subset of all adaptive filter coefficients is updated in each sampling period. Of course, the set of coefficients selected for the update must vary in time, and the way of selection is the main factor in which particular PU algorithms differ. The goal of this paper is to present the application of PU LMS-family algorithms to a multichannel, structural ANC system. The algorithms selected for research will be presented in Section 2, while the laboratory setup will be detailed in Section 3. The results of simulations will be presented in Section 4, and the paper will be concluded in Section 5.

## 5.2. Partial Update LMS Algorithms with Leakage

Although the idea of PU can be applied to any recursive algorithm, we will concentrate our attention on the LMS algorithm only, which is the dominant algorithm used in ANC systems. We will also restrain our focus to time-domain PU algorithms, which can be roughly divided into data-independent and data-dependent algorithms [4].

The idea of data-independent algorithms is particularly simple in case of the periodic PU algorithm, which updates all the filter parameters not in each iteration, but only once a selected period. This algorithm can be applied in a structural ANC system to update all the control filters in a sequence: the first filter in one iteration, the next in the second, and so on. Another data-independent PU algorithm is called the sequential PU. This algorithm partitions all the filter coefficients into a selected number of subsets. The way the subsets are created can be freely designed, as it rarely affects the behavior of the algorithm. Detailed information can be found, e.g. in [3].

As indicated in the Introduction, in case of the discussed structural ANC system the number of actuators may be higher than the number of error sensors. For such system, it is necessary to introduce the leakage to avoid the system to be indeterminate [8]. The leakage indirectly introduces minimization of control efforts, which also reduces interferences between different actuators. Therefore, the equation describing the sequential PU algorithm with leakage, can be given as:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{G}_M(n)\mathbf{w}(n) - \mu\mathbf{I}_M(n)\mathbf{u}(n)e(n), \quad (5.1)$$

where  $\mathbf{w}(n)$  is the vector of filter coefficients of size  $L$  in iteration  $n$ ,  $\mathbf{G}_M(n)$  is the leakage matrix,  $\mu$  is the step size,  $\mathbf{I}_M(n)$  is the coefficient selection matrix,  $\mathbf{u}(n)$  is the vector if input signal samples and  $e(n)$  is the error.

The coefficient selection matrix  $\mathbf{I}_M(n)$  is a diagonal matrix with elements on the diagonal equal to 1, if a corresponding coefficient is selected for update, or 0, if not:

$$\mathbf{I}_M(n) = \begin{bmatrix} i_0(n) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & i_1(n) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & i_{L-1}(n) \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

where

$$i_k(n) \in \{0, 1\}, \quad \sum_{k=0}^{L-1} i_k(n) = M. \quad (5.3)$$

The number of coefficients to be updated in each iteration is equal to  $M < L$ .

The leakage matrix  $\mathbf{G}_M(n)$  is a diagonal matrix as well, and is defined as:

$$\mathbf{G}_M(n) = \begin{bmatrix} g_0(n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_1(n) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & g_{L-1}(n) \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

where

$$g_k(n) \in \{1, \gamma\}. \quad (5.5)$$

Specifically, the matrix contains elements equal to 1 in the rows corresponding to 0-s in the  $\mathbf{I}_M(n)$  matrix, and a selected value of leakage  $\gamma$  in the rows corresponding to 1-s in the coefficient selection matrix. In this way, the leaky version of the PU-LMS algorithm in Eq. (5.1) applies leakage in a particular iteration only to those coefficients, which are updated in this iteration. Otherwise, the advantage of processing of only a subset of parameters would be ruined.

When the LMS-family algorithm is applied to an ANC system, the effect of the secondary path must be accounted for; otherwise stability issues may arise [5]. In case of the research reported in this publication, the filtered-x structure was used. Moreover, as the system under consideration was a multiple-error system, so the update equation was:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{G}_M(n)\mathbf{w}(n) - \mu \mathbf{I}_M(n) \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k(n) e_k(n), \quad (5.6)$$

where  $K$  is the number of error signals and  $\mathbf{x}_k(n)$  are the vectors of reference signal samples filtered through a corresponding secondary path estimate.

The inherent feature of data-independent PU algorithms is a performance degradation: one may expect that the convergence speed will be  $B$  times lower when the filter coefficients are divided into  $B$  groups that are updated sequentially [2,3]. The same does not apply to data-dependent algorithms, which select the coefficients to be updated to achieve the best update performance. The simplest example of this group is the of  $M$ -max PU-LMS algorithm, which is based on idea of finding  $M$  those entries in the input vector, that result in the largest magnitude changes of the filter coefficients. The mathematical notation of the algorithm used in this research is the same as in Eq. (5.6), only the way the coefficient selection matrix is constructed changes. Although this algorithm requires sorting of the input vector, which is in general a time-consuming task, effective numerical algorithms exist to sort a vector which contains samples of one signal, delayed in time [4].

The  $M$ -max PU-LMS algorithm can be also used with the step size normalization, in which case it is referred to as the *M-max PU-NLMS algorithm*. It is also possible to derive an algorithm with the step size normalization and working according to the  $M$ -max principle using the optimization techniques. The derivation results in a slightly different step size update, given by:

$$\mu(n) = \frac{\bar{\mu}}{\mathbf{u}^T(n) \mathbf{I}_M(n) \mathbf{u}(n)}, \quad (5.7)$$

where  $\bar{\mu}$  is the normalized step size.

Such algorithm is called a *Selective PU-NLMS* algorithm, and it differs with the  $M$ -max PU-NLMS in the denominator of the above expression: the Selective PU-NLMS algorithm considers also the coefficient selection matrix while the  $M$ -max PU-NLMS does not.

The idea of a PU algorithm which finds the maxima of the input vector can be put to an extreme with  $M = 1$ , in which case only one filter coefficient is updated in each iteration [3]. Such algorithm can be particularly computationally effective, as it does not require sorting of the input vector, but only finding the maximum absolute value. This algorithm was also considered in this research and it will be referred to as the *One Tap Update LMS* (OTU LMS).

### 5.3. Experimental setup

Although the results presented below are from simulations only, all the models used in the research come from identification experiments performed on the laboratory setup consisting of a cubic casing with rigid corners and 1 mm thick aluminum plates. The casing was positioned in a laboratory at least 70 cm from the walls; therefore five plates were controlled, while the bottom was passively isolated. Each plate, 420 × 420 mm, was equipped with three electrodynamic Monacor EX-1 5 Watt actuators, mounted in carefully selected positions to improve controllability of the system. An error microphone was positioned in front of each wall. More details on the setup can be found in [6].

From the above description one can infer that there were 15 actuators and 5 error sensors (microphones). Such setup results in 75 different secondary paths, which were identified in a form of FIR filters with 256 parameters. During the identification experiments, the excitation in a form of a white noise signal was applied to each of the actuators separately with the sampling frequency of 2 kHz. Moreover, a loudspeaker was placed inside the casing, and the primary paths (5) were identified in the same form. A reference signal path was identified as well between the loudspeaker and a microphone placed inside the casing.

Figure 5.1 presents the part of the block diagram of the control system, associated with one plate (front) and one error signal.

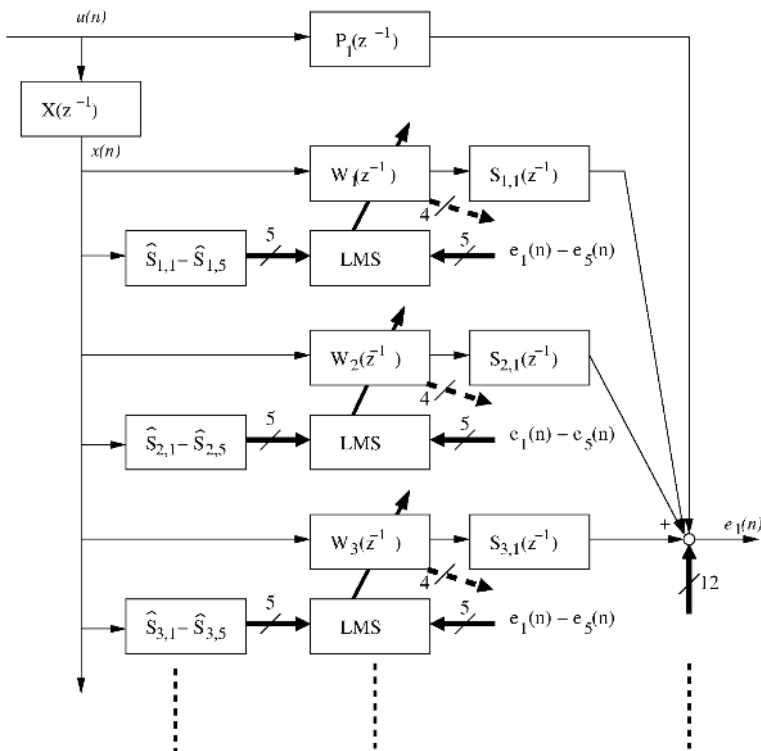
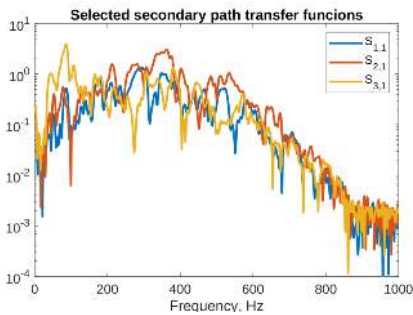
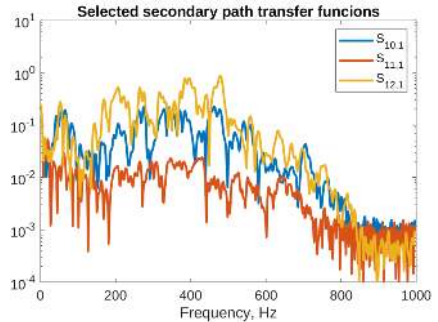


Fig. 5.1. Block diagram of the Multiple-Error Filtered-x LMS algorithm

The primary signal,  $u(n)$ , is filtered through the reference path transfer function,  $X(z^{-1})$ , to produce the reference signal,  $x(n)$ . This reference signal forms the input signal to the three control filters attached to the front plate. Each control filter produces the output which is then filtered with five different secondary path transfer functions; one of these functions for each filter is visible on the figure (i.e.  $S_{1,1}(z^{-1})$ ,  $S_{2,1}(z^{-1})$ , and  $S_{3,1}(z^{-1})$ ), while the remaining four belong to the other error signal paths. Thus, each error signal is a sum of 16 signals: one primary and 15 signals coming from the 15 actuators. All the 5 error signals are used by each of the adaptation algorithms (denoted as LMS), together with 5 reference signals, each filtered through a different secondary path transfer function estimate. Exemplary secondary path transfer functions are illustrated in Figs. 5.2 and 5.3.



**Fig. 5.2.** Secondary path transfer functions from the front plate actuators to the front plate error microphone



**Fig. 5.3.** Secondary path transfer functions from the top plate actuators to the front plate error microphone

For the experiments presented below, the system was parametrized as follows. The length of the control filters used was 128. The step size used with the non-normalized adaptation algorithms was equal to 0.0002, while the normalized step size was equal to  $5 \cdot 10^{-6}$ . The step sizes were experimentally adjusted with a great care to achieve as fast as possible convergence speed, but to avoid unwanted effects that frequently appear in ANC systems with too large step sizes [1]. Different leakage factors were used for different control filters, with values from 0.99999 to 0.99. The procedure to adjust the leakage factors was also experimental and depended on the observation of the filter output signals. If a selected output signal was of a high power or of still increasing values, the leakage factor was lowered until the effect was prevented. Unfortunately, this procedure needed to be repeated for each attenuated frequency since the secondary path transfer functions differ in magnitude for different frequencies, as presented in Figure. Finally, ideal secondary path transfer function estimates were used to avoid an additional factor with uncertain influence.

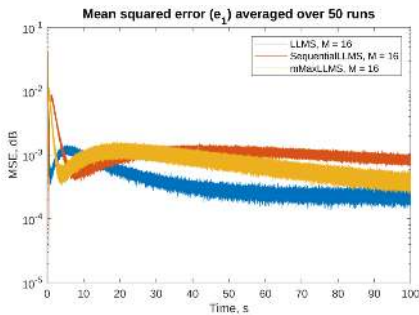
## 5.4. Simulation results

The simulations were performed for different primary signals, containing both the narrowband and broadband signals. This resulted in a large number of simulation result, which cannot be presented here due to limited space. Moreover, the goal of this paper is not to prove that the discussed structural ANC system can effectively work, but to compare the performance of different leaky partial update algorithms. Therefore, only the results of attenuation of single frequency (tonal) signal will be presented here. The selected frequency was equal to 112 Hz, and a white noise of small variance (0.0001) was added to it for better reproduction of real conditions. To make the results easier to analyze, each simulation was repeated

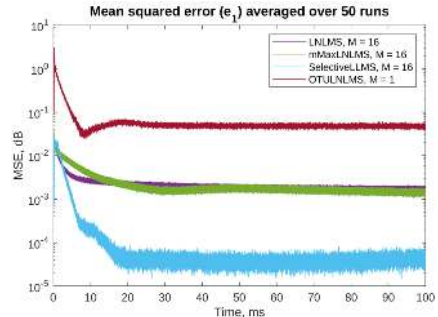
50 times, with different sine signal initial phase and different white noise sequence. This resulted in smoother mean square error (MSE) plots.

Fig. 5.4 presents the MSE for the first error microphone signal during simulation with the leaky sequential PU-LMS and leaky M-max PU-LMS algorithms, where the results of unmodified Leaky LMS algorithm are showed for comparison. The number of parameters updated in each iteration was selected as 16 (out of 128). As can be noticed (and as expected), the non-partial update LMS algorithm is the fastest to converge, but after initial convergence, the MSE increases slightly until approximately the 6th second of the simulation; then it decreases gradually to achieve around 30 dB of attenuation at the end of the simulation. The Sequential PU-LMS algorithm shows similar behavior, but is the slowest to converge, while the M-max PU-LMS is between. This order (LMS fastest, Sequential PU-LMS slowest) is the same for all error microphones — see e.g. Fig. 5.6, where the results for the second error microphone are presented, for comparison.

Fig. 5.5 presents analogous plots for the algorithms with the normalized step sizes, and contains the results of unmodified Leaky NLMS algorithm for comparison. In this case, the speed of convergence is comparable for all the algorithms, but the final attenuation level differs significantly. Both the NLMS (purple) and M-max PU-NLMS (green) algorithms result in around 25 dB of attenuation, while the Selective PU-LMS reaches more than 40 dB. On the other hand, the One Tap Update algorithms does not perform impressively and reaches only around 10 dB of attenuation. Very similar results were obtained for the other error microphones — see e.g. Fig. 5.7, where the results for the fourth error microphone are presented, for comparison.



**Fig. 5.4.** Simulation results for algorithms without step size normalization,  $M = 16$

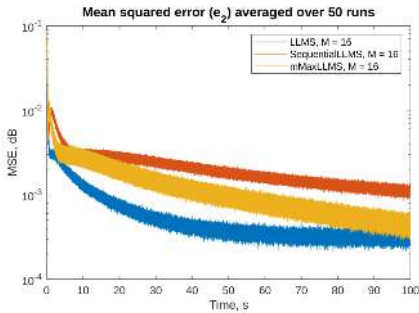


**Fig. 5.5.** Simulation results for algorithms with step size normalization,  $M = 16$ .

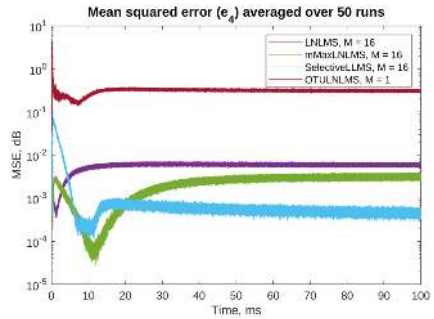
The observed behavior is typical to the PU algorithms, among which the data-independent algorithms, while offering the best computational power saves, suffer from decrease of convergence speed, proportional to the number of parameters which are not updated in each iteration. The data-dependent algorithms, on the other hand, usually perform comparably with their non-partial versions, but in some cases can even outperform the full-update algorithms.

In case of the multiple-error system reported in this publication, it is interesting to observe the individual controller outputs during the simulations. Exemplary plots of such outputs, recorded during a single run of a Leaky Selective PU-LMS algorithm only, are presented in Figs. 5.8 and 5.9. As can be noticed, each individual controller performs in a slightly different manner: for example, the controller 6 action (orange in Fig. 5.8) increases rapidly at the beginning of the simulation, then decreases and then increases gradually. The controller 7 action (yellow) first increases, then decreases. The controller 8 action (purple) increases gradually during the whole simulation, but is smaller in magnitude than the

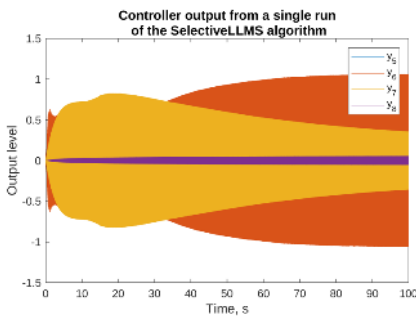
two discussed. The highest magnitude is this of controller 11 output (yellow in Fig. 5.9) — notice the change in the output level scale between the two figures.



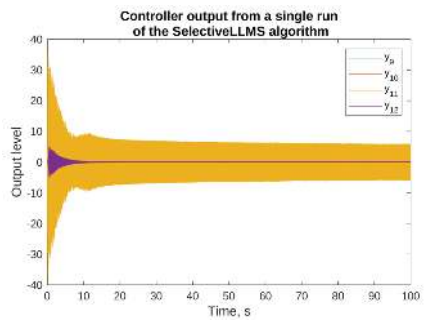
**Fig. 5.6.** Simulation results for algorithms without step size normalization,  $M = 16$



**Fig. 5.7.** Simulation results for algorithms with step size normalization,  $M = 16$



**Fig. 5.8.** Exemplary controller output action for left ( $y_5$ – $y_6$ ) and right ( $y_7$ – $y_8$ ) panel actuators

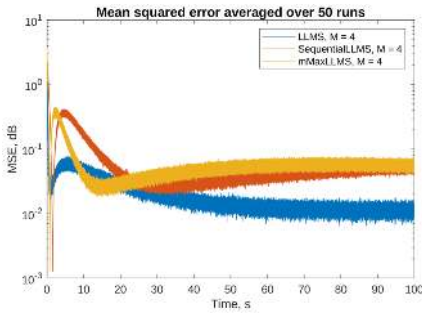


**Fig. 5.9.** Exemplary controller output action for right ( $y_9$ ) and top ( $y_{10}$ – $y_{12}$ ) panel actuators

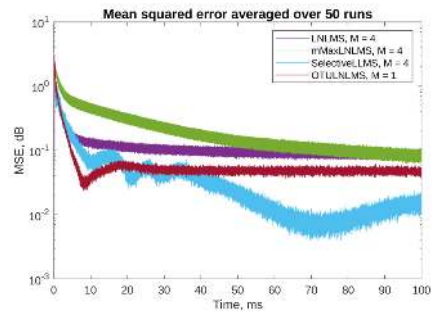
Results similar to those obtained with  $M = 16$  were obtained for  $M = 8$ , with the obvious consequence of smaller convergence speeds for data-independent algorithm, and only slightly worse attenuation levels at the end of simulation (100 s) for all the algorithms. However, for  $M = 4$ , the situation was different, as can be noticed in Figs. 5.10 and 5.11. The attenuation levels obtained during the simulation are significantly worse: only around 20 dB for the Leaky LMS and the Selective PU-NLMS algorithms, and around 10 dB for the others. From this fact one can conclude that 4 parameters for update is a number too small in this application.

## 5.5. Conclusions

Partial updates, and among them the family of PU-LMS algorithms in particular, gained a lot of attention in publications from different fields of science during last years. The algorithms offer substantial computational power savings without significant degradation of performance: in fact, the performance can even be improved when compared to full update algorithms.



**Fig. 5.10.** Simulation results for algorithms without step size normalization,  $M = 4$



**Fig. 5.11.** Simulation results for algorithms without step size normalization,  $M = 4$

This paper presents the application of PU-LMS algorithms to a structural ANC system of high dimensionality: 5 error sensors, 15 actuators and 75 secondary paths in total. The main novelty of the research is in modification of the PU-LMS algorithms to consider the leakage, which is necessary for the considered multichannel ANC system. The presented simulation results show that the leaky PU-LMS algorithms can be successfully used in this application. The next step will be to confirm the results in a real-world application.

## Acknowledgements

The research reported in this paper has been supported by the National Science Centre, Poland, decision No. DEC2017/25/B/ST7/02236.

## Bibliography

- [1] D. Bismor, *IEEE Signal Processing Letters*, 21(5), 635–637, 2014.
- [2] D. Bismor, *Partial update LMS algorithms in active noise control*, in: Proceedings of Forum Acusticum 2014, 1–7, Kraków, 2014.
- [3] D. Bismor, *Simulations of partial update LMS algorithms in application to active noise control*, *Procedia Computer Science*, 80, 1180–1190, 2016.
- [4] K. Doğançay, *Partial-Update Adaptive Signal Processing, Design, Analysis and Implementation*, Academic Press, Oxford, 2008.
- [5] S. Elliott, *Signal Processing for Active Noise Control*, Academic Press, London, 2001.
- [6] K. Mazur, M. Pawelczyk, *Active control of noise emitted from a device casing*, in: Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 2015.
- [7] K. Mazur, S. Wrona, M. Pawelczyk, *Design and implementation of multichannel global active structural acoustic control for a device casing*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 877–889, 2018.
- [8] World Health Organization. *Reducing Global Health Risks Through Mitigation of Short-Lived Climate Pollutants*. Scoping Report For Policy-makers. WHO, Switzerland, 2015.
- [9] S. Wrona, M. de Diego, M. Pawelczyk, *Shaping zones of quiet in a large enclosure generated by an active noise control system*, *Control Engineering Practice*, 80, 1–16, 2018.



- [10] S. Wrona, M. Pawelczyk, *Shaping frequency response of a vibrating plate for passive and active control applications by simultaneous optimization of arrangement of additional masses and ribs. Part II: Optimization*, Mechanical Systems and Signal Processing, 70–71, 699–713, 2016.



## Rozdział 6

# Metody oceny parametrów ekranów akustycznych z modułami fotowoltaicznymi

Romuald Bolejko, Paweł Dziechciński, Przemysław Plaskota,  
Barbara Rudno-Rudzińska

*Politechnika Wroclawska, Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów,  
wyb. Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław*

e-mail: [romuald.bolejko@pwr.edu.pl](mailto:romuald.bolejko@pwr.edu.pl)

Ekran akustyczny są konstruowane z elementów o określonej izolacyjności akustycznej oraz określonych właściwościach pochłaniania dźwięku. Umieszczenie paneli fotowoltaicznych na istniejących ekranach akustycznych może spowodować zmianę ich dźwiękochłonności oraz izolacyjności akustycznej. Typowe sztywne i pełne panele fotowoltaiczne na ogół wykazują słabe właściwości dźwiękochłonne. W przypadku ich montażu na istniejących ekranach pochłaniających może nastąpić silna redukcja zdolności pochłaniania dźwięku przez ekrany, a tym samym znaczne obniżenie efektywności tłumienia przez nie hałasu. W artykule została przedstawiona metodyka oceny wpływu paneli fotowoltaicznych na podłożu elastycznym umieszczonych na ekranie akustycznym na jego właściwości dźwiękochłonne. Porównano wyniki uzyskane metodami obliczeniowymi i metodą pomiarową in-situ dla wybranej konfiguracji rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na dźwiękochłonnym ekranie akustycznym.

### 6.1. Wprowadzenie

Do oceny właściwości ekranów akustycznych stosuje się trzy grupy tzw. cech charakterystycznych: pochłanianie dźwięku, izolacyjność akustyczną i dyfrakcję dźwięku. Właściwości dźwiękochłonne ekranów akustycznych ulegną zmianie na skutek umieszczenia na nich twardych elementów, jakimi są panele fotowoltaiczne (PF). Ocena tych zmian może być przeprowadzona poprzez pomiary prototypów ekranów lub ich elementów [3] albo poprzez obliczenia lub modelowanie, dla określonej konstrukcji ekranu z panelami. Modelowanie parametrów akustycznych ekranów z panelami PF może być zrealizowane za pomocą metod analitycznych lub numerycznych. Rozwiązania analityczne istnieją tylko dla prostych przypadków, na ogół bez uwzględnienia wielu szczegółów konstrukcyjnych, natomiast modelowanie numeryczne daje możliwość wykonania obliczeń dla konstrukcji skomplikowanych, praktycznie o dowolnym kształcie i konfiguracji paneli. Podstawowym ograniczeniem metod numerycznych, jest ko-

nieczność opracowania modeli cyfrowych modelowanych obiektów oraz znacznie dłuższy czas obliczeń, niż metod analitycznych.

Wyznaczenie parametrów akustycznych ekranów z panelami fotowoltaicznymi metodami pomiarowymi także ma zalety i wady. Z jednej strony badania nad prototypami pozwalają uzyskać wiarygodne i dokładne parametry, z drugiej jednak są kosztowne i czasochłonne ze względu na konieczność wykonania fizycznych pomiarów.

## 6.2. Metody obliczeniowe

Współczynnik pochłaniania dźwięku określa ilościowo zdolność pochłaniania dźwięku badanej płaszczyzny. Teoretycznie właściwości każdej powierzchni są jednoznacznie określone przez jej impedancję akustyczną. Na podstawie impedancji akustycznej możliwe jest zatem wyznaczenie jego współczynnika pochłaniania dźwięku. Pewną trudnością jest fakt, że pochłanianie dźwięku zależy także od kąta padania fali. Pochłanianie dźwięku przy określonym kącie padania fali akustycznej na badaną powierzchnię jest określone przez fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku. Współczynnik ten dla prostopadłego padania fali płaskiej wyznacza się z równania:

$$\alpha_f = 1 - \left| \frac{Z_{aj} - \rho_0 c}{Z_{aj} + \rho_0 c} \right|^2 \quad (6.1)$$

gdzie:  $Z_{aj}$  – akustyczna impedancja jednostkowa płaszczyzny/ustroju,  $\rho_0 c$  – akustyczna impedancja właściwa ośrodka, dla powietrza przy 20°C równa 415 rayl.

Akustyczną impedancję jednostkową ustroju dźwiękochłonnego można wyznaczyć analitycznie z odpowiednich równań określonych dla materiałów porowatych i włóknistych lub dla ograniczonej liczby przypadków konstrukcji rezonansowych ustrojów pochłaniających dźwięk. Rozwiązania analityczne jednak istnieją tylko dla jednorodnych materiałów oraz dla prostych konstrukcji ustrojów dźwiękochłonnych. Teoretycznie  $Z_{aj}$  ustrojów o dowolnej budowie może być wyznaczona wykorzystując metody numeryczne: elementów brzegowych BEM (Boundary Elements Method) i elementów skończonych FEM (Finite Elements Method).

W przypadku metod numerycznych impedancję jednostkową można wyznaczać z rozkładu prędkości i ciśnienia akustycznego na powierzchni licowej ustroju. Na podstawie ciśnienia  $p$  i prędkości akustycznej  $V$  oblicza się akustyczną impedancję jednostkową z zależności:

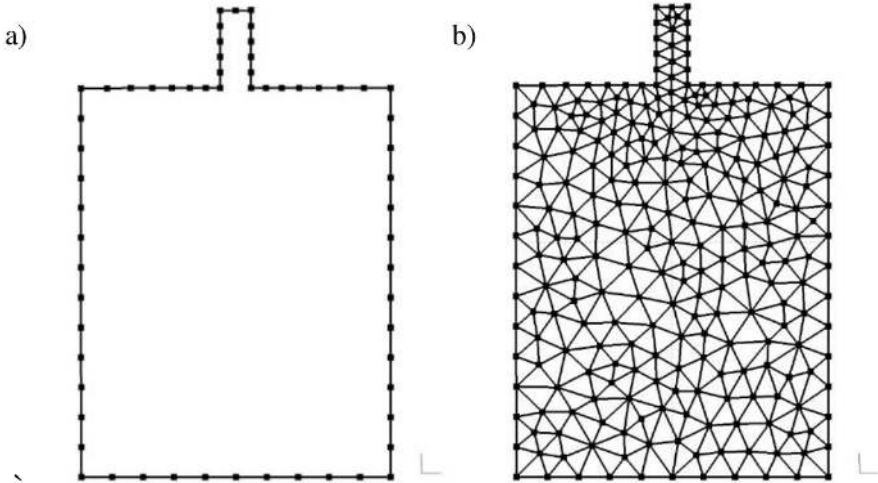
$$Z_{aj} = Z_a S_u = \frac{p}{V} S_u = \frac{p}{v} \quad (6.2)$$

gdzie:  $Z_a$  – impedancja akustyczna [rayl/m<sup>2</sup>],  $p$  – ciśnienie akustyczne [Pa],  $V$  – prędkość objętościowa (akustyczna) [m<sup>3</sup>/s],  $v$  – prędkość liniowa [m/s],  $S_u$  – pole powierzchni licowej ustroju [m<sup>2</sup>].

Metody numeryczne w odróżnieniu od metod analitycznych umożliwiają obliczenia parametrów pola akustycznego praktycznie dla dowolnej geometrii modelowanego obiektu oraz praktycznie wszystkich możliwych warunków brzegowych, np. miękkich akustycznie ścianek komory rezonatora. W metodach BEM i FEM, rzeczywisty, ciągły, modelowany obszar lub jego brzeg, są zastępowane zbiorem elementów dyskretnych o małych wymiarach w odniesieniu do długości fali akustycznej. Na podstawie wartości w węzłach stosując aproksymację za pomocą wielomianów wartości parametrów akustycznych w obrębie elementu skończonego możliwe jest utworzeniu układu  $N$  równań z  $N$  niewiadomymi. Wartości w węzłach siatki otrzymuje się poprzez rozwiązanie równania falowego dla zadanych warunków brzegowych. Liczba  $N$  określa liczbę węzłów w modelu dyskretnym.

W metodzie BEM dyskretyzacji podlega tylko brzeg modelowanego obszaru zamkniętego. Ciśnienie i prędkość akustyczne wewnątrz lub na zewnątrz zamkniętego obszaru wyznaczone są na podstawie roz-

kładu ciśnienia i prędkości akustycznej wyłącznie na jego brzegu. Przykładową dwuwymiarową siatkę elementów brzegowych dla klasycznego dwuwymiarowego rezonatora Helmholtza ilustruje Rys. 6.1a.



**Rys. 6.1.** Siatka 2D: elementów brzegowych (a) i elementów skończonych (b) pojedynczego dwuwymiarowego rezonatora Helmholtza

Ciśnienie akustyczne w dowolnym punkcie  $X$  jest wyznaczone na podstawie rozkładu ciśnienia akustycznego  $p(Y)$  i jego pochodnej w kierunku normalnym do elementu brzegowego  $\partial_n p(Y)$  określonych na powierzchni siatki elementów brzegowych  $S$ :

$$p(X) = \int_S (p(Y)\partial_n G(X,Y) - G(X,Y)\partial_n p(Y))dS(Y) \quad (6.3)$$

gdzie:  $G(X,Y) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}$  jest funkcją Greena,  $r = |Y - X|$ , natomiast  $k$  jest liczbą falową.

Z kolei rozkład ciśnienia akustycznego  $p(Y)$  i jego pochodnej w kierunku normalnym do elementu brzegowego  $\partial_n p(Y)$  wyznacza się na podstawie warunków brzegowych określonych w modelu.

W metodzie BEM występują trudności przy modelowaniu pola akustycznego wewnątrz i jednocześnie na zewnątrz obszaru częściowo otwartego, albowiem występuje nieciągłość brzegu. W przypadku modelowania rezonansowych ustrojów dźwiękochłonnych to ograniczenie metody jest bardzo istotne, ponieważ nie pozwala uwzględnić rezystancji promieniowania wylotu szyjki rezonatora, ani wzajemnej impedancji promieniowania grupy rezonatorów. Z tego względu przydatność metody BEM przy wyznaczaniu właściwości dźwiękochłonnych ustrojów akustycznych typu rezonator Helmholtza wydaje się być ograniczona. Co więcej przeprowadzone w ramach niniejszej pracy próby wyznaczania właściwości dźwiękochłonnych ustrojów szczelinowych na podstawie rozkładu ciśnienia i prędkości akustycznej na powierzchni rezonatora metodą BEM nie umożliwiły uzyskanie wiarygodnych wyników.

W metodzie FEM dyskretyzacji podlega cały modelowany obszar (Rys. 6.1b). Z tego względu metoda ta szczególnie nadaje się do modelowania pola akustycznego wewnątrz ograniczonego obszaru. Analiza zagadnień promieniowania w polu nieograniczonym, tzw. swobodnym, wymaga odpowiedniego „akustycznie nieskończonego” zakończenia modelowanej przestrzeni. Do tego celu stosuje się tzw. dyskretne elementy „infinite”, ewentualnie odpowiednio sformułowane „nieskończone” warunki brzegowe [1].

Ciśnienie akustyczne w modelach FEM jest wyznaczane na podstawie rozwiązania układu  $N$  równań przy zadanych warunkach brzegowych, co może być zapisane w postaci macierzowej:

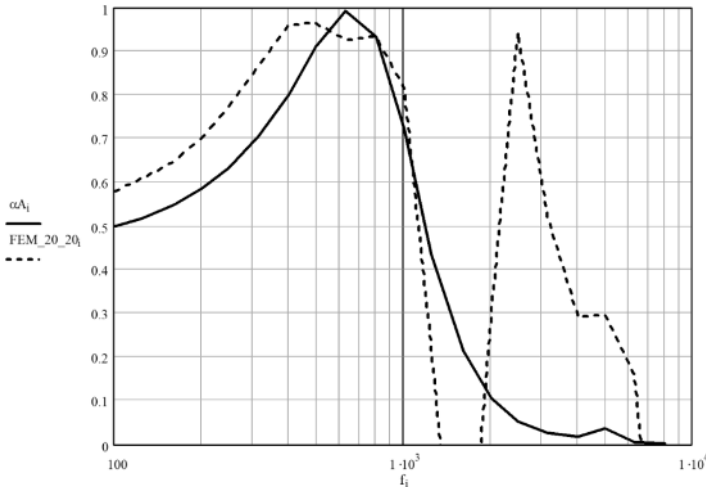
$$([K] + i\rho\omega[C] - \omega^2[M])\{p\} = -i\rho\omega\{F\} \quad (6.4)$$

gdzie:  $[K]$  – macierz sztywności akustycznej,  $[C]$  – macierz strat,  $[M]$  – macierz masy akustycznej,  $\{p\}$  – wektor ciśnienia akustycznego w węzłach,  $\{F\}$  – wektor pobudzenia akustycznego w węzłach.

Z kolei prędkość akustyczna w metodzie FEM jest wyznaczana na podstawie różniczki ciśnienia akustycznego wzdłuż wybranych kierunków w poszczególnych węzłach siatki.

Metoda FEM jest dostępna w wielu komercyjnych programach komputerowych i na ogół daje wiarygodne wyniki obliczeń. Dlatego w niniejszej pracy weryfikację możliwości modelowania właściwości dźwiękochłonnych rezonansowych ustrojów Helmholtza głównie oparto na metodzie FEM.

Na Rys. 6.2 przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika pochłaniania dźwięku szczelinowego ustroju dźwiękochłonnego metodą analityczną i metodą FEM. W badaniach wykorzystano ustrój szczelinowy o konstrukcji: szerokość i grubość deski, odpowiednio 20 cm i 3 mm, szerokość szczeliny 20 cm. Deski ustroju szczelinowego były umieszczone w odległości 2 cm od płaszczyzny wykazującej silne pochłanianie dźwięku.



**Rys. 6.2.** Obliczony fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku ustroju szczelinowego MS\_3-20-20\_2 metodą analityczną ( $\alpha_A$ ) i metodą FEM

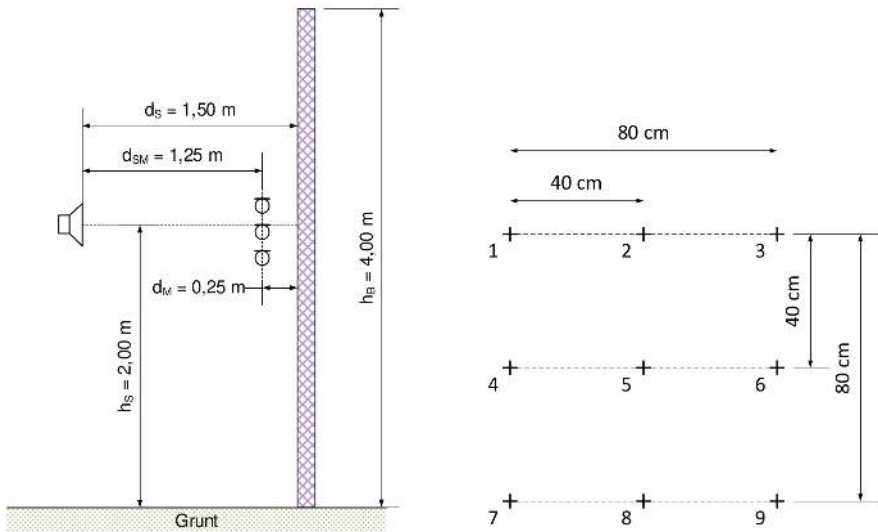
Z przedstawionych obliczeń wynika, że metodą numeryczną uzyskuje się dużą zbieżność z wynikami metody analitycznej w zakresie częstotliwości odpowiadającym częstotliwości rezonansowej takiego rezonatora Helmholtza (około 600 Hz), natomiast występuje dość duża rozbieżność dla wyższych częstotliwości. Dla częstotliwości powyżej 1 kHz założenia metody analitycznej dotyczące skupionej masy powietrza w szczelinie rezonatora nie są spełnione, stąd rozbieżność w uzyskanych wynikach.

### 6.3. Metoda i stanowisko pomiarowe

Do pomiarów właściwości pochłaniających ekranów akustycznych mają zastosowanie dwie metody – metoda laboratoryjna (pomiar w warunkach pogłosowych) oraz w warunkach in-situ (od dźwięków

bezpośrednich). Procedury pomiarowe są podane w normie PN-EN 16272-1 [4] w odniesieniu do ekranów kolejowych oraz w PN-EN 1793-5 [5] w odniesieniu do ekranów drogowych. Metodyki pomiarów stosowane w normach z serii PN-EN 1793 i PN-EN 16272 są analogiczne. Zasadnicza różnica polega na zastosowaniu innego znormalizowanego widma hałasu przy wyznaczaniu jednolicebnych wskaźników oceny właściwości pochłaniających i izolacyjności akustycznej ekranu. Do pomiarów właściwości akustycznych ekranów z panelami fotowoltaicznymi wykorzystano metodę in-situ. Jest to metoda impulsowa, w której wielkością wyznaczaną jest charakterystyka częstotliwościowa wskaźnika odbicia  $RI$ . Metody pomiaru in-situ są z założenia prowadzone w warunkach pola swobodnego.

Przyjęta w normie PN-EN 1793-5 [5] metoda pomiaru in-situ właściwości pochłaniających ekranów akustycznych polega na wygenerowaniu sygnału dźwiękowego przed ekranem akustycznym i równoczesnym rejestrowaniu dźwięku odbitego dla 9 pozycji mikrofonów. Minimalne wymiary badanego ekranu akustycznego wynoszą  $4 \times 4$  m. Konfiguracja układu pomiarowego jest zdefiniowana w normie i pokazana na Rys. 6.3.



**Rys. 6.3.** a) Standardowa geometria stosowana do pomiarów wskaźnika  $RI$ , b) układ i numery mikrofonów pomiarowych (widok od strony głośnika)

Mikrofony pomiarowe rozmieszczone są w siatce w odstępach w poziomie i pionie co 0,4 m. Środkowy mikrofon linii centralnej oznaczony jest indeksem 5. Standardowa odległość między czołem głośnika a płaszczyzną odniesienia ekranu wynosi 1,50 m, odległość między siatką pomiarową a płaszczyzną odniesienia wynosi 0,25 m. Podstawą do wyznaczenia wskaźnika odbicia dźwięku są dwie dziewięciokanałowe odpowiedzi impulsowe. Jedna z odpowiedzi impulsowych wyznaczona jest w obecności ekranu, a więc zawiera zarówno dźwięk bezpośredni jak i odbity od ekranu. Druga odpowiedź impulsowa wyznaczana jest w polu swobodnym, a więc zawiera tylko dźwięk bezpośredni. Do wyznaczenia energii dźwięku odbitego od ekranu wykorzystuje się odpowiedź impulsową wyznaczoną jako różnica między odpowiedzią impulsową w obecności ekranu, a odpowiedzią dla pola swobodnego. W praktyce zarówno odpowiedź impulsowa w obecności ekranu jak i dla dźwięku bezpośredniego wyznaczane są nad powierzchnią gruntu. Zawierają więc składową związaną z odbiciem od gruntu. Ponadto odpowiedź impulsowa wyznaczana w obecności ekranu zawiera składowe związane z dyfrakcją na krawędziach ekranu. Wyznaczając odpowiedzi impulsowe dla odpowiednio dużej wysokości nad powierzchnią gruntu

oraz dla odpowiednio dużej próbki, niepożądane składowe można wyeliminować poprzez zastosowanie okna czasowego Adrienne [5].

Wskaźnik odbicia dźwięku  $RI$  wyznacza się jako stosunek energii dźwięku odbitego do dźwięku bezpośredniego w pasmach 1/3 oktawy, uwzględniając odpowiednie współczynniki korekcyjne. Operację taką wykonuje się niezależnie dla każdego z mikrofonów. Wynikiem końcowym dla danego pasma 1/3 oktawy jest średnia arytmetyczna uzyskana dla każdej z dziewięciu pozycji. Zależność wykorzystywaną do wyznaczania wskaźnika odbicia dźwięku  $RI$  przedstawia wzór:

$$RI_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \frac{\int_{\Delta f_j} |F[h_{r,k}(t) \cdot w_{r,k}(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[h_{i,k}(t) \cdot w_{i,k}(t)]|^2 df} \cdot C_{geo,k} \cdot C_{dir,k}(\Delta f_j) \cdot C_{gain,k}(\Delta f_g) \quad (6.5)$$

gdzie:  $h_{i,k}(t)$  – odpowiedź impulsowa w polu swobodnym w  $k$ -tym punkcie pomiarowym,  $h_{r,k}(t)$  – składowa odpowiedzi impulsowej związana z odbiciem od badanego elementu w  $k$ -tym punkcie pomiarowym,  $w_{i,k}(t)$  – okno czasowe (Adrienne) nakładane na odpowiedź impulsową zmierzoną w polu swobodnym w  $k$ -tym punkcie pomiarowym,  $w_{r,k}(t)$  – okno czasowe (Adrienne) nakładane na składową odpowiedzi impulsowej wynikającą z odbicia od badanego elementu w  $k$ -tym punkcie pomiarowym,  $F$  – transformata Fouriera,  $j$  – indeks  $j$ -tego pasma 1/3 oktawy o częstotliwości środkowej z zakresu od 100 Hz do 5 kHz;  $\Delta f_j$  – szerokość  $j$ -tego pasma 1/3 oktawy,  $n$  – liczba punktów pomiarowych,  $k$  – numer punktu pomiarowego,  $C_{geo,k}$  – współczynnik korekcji wynikający z rozbieżności geometrycznej punktów pomiarowych,  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  – współczynnik korekcji wynikający z charakterystyki kierunkowości źródła dla  $k$ -tego punktu pomiarowego,  $C_{gain,k}(\Delta f_g)$  – współczynnik korekcji uwzględniający i kompensujący zmianę ustawień wzmocnienia źródła i ustawień czułości poszczególnych mikrofonów po zmianie konfiguracji między pomiarem w polu swobodnym a pomiarem w obecności badanego elementu.

Do oceny właściwości akustycznych ekranu określa się jednoliczbowy wskaźnik  $DL_{RI}$ , wyrażony w decybelach, wyznaczany z zależności:

$$DL_{RI} = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=m}^{18} RI_i \cdot 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i}} \right] \quad (6.6)$$

gdzie:  $m$  – numer najniższego pasma 1/3 oktawy, dla którego wyniki pomiaru są wiarygodne,  $L_i$  – skorygowany poziom znormalizowanego widma hałasu drogowego z PN-EN 1793-3 [6] lub kolejowego z PN-EN 16272-3-2 [7]. W przypadku, gdy iloraz sumowań we wzorze (6) jest większy od 1, do obliczeń wartości  $DL_{RI}$ , należy przyjąć maksymalną wartość 0,99 [5].

Do celu badań właściwości pochłaniających ekranu akustycznego z modułami fotowoltaicznymi w komorze akustycznej Politechniki Wrocławskiej zostało opracowane specjalne stanowisko pomiarowe (Rys. 6.4). Wymiary komory akustycznej wynoszą: 14×10×7 m, a objętość 980 m<sup>3</sup>. Ściany i sufit komory wyłożone są materiałami pochłaniającymi, podłoga jest odbijająca. W komorze został zmontowany metalowy ekran akustyczny o wymiarach 4 × 4 m, który podczas pomiarów był ustawiony tak aby w odległości 2 m od ekranu nie występowały żadne powierzchnie odbijające. Do pomiarów wykorzystano system pomiarowy wykonany we własnym zakresie [2]. System zaprojektowano tak, aby spełniał wymagania normy PN-EN 1793-5:2016. Opracowany system może być wykorzystywany zarówno w warunkach laboratoryjnych – z dostępem do sieci elektrycznej, jak i w warunkach terenowych z zasilaniem akumulatorowym. Do wykonania matrycy mikrofonowej zastosowano mikrofony o średnicy 1/4" i spełniające wymagania stawiane mikrofonom klasy pierwszej. Mikrofony zostały rozmieszczone na zaprojektowanej ramie metalowej. W wykonanym systemie wykorzystano popularny foniczny interfejs z 12 wejściami mikrofonowymi, który dla pomiarów z dziewięcioma kanałami umożliwia przetwarzanie sygnałów z częstotliwością próbkowania do 96 kHz.





Rys. 6.4. Stanowisko pomiarowe w komorze akustycznej

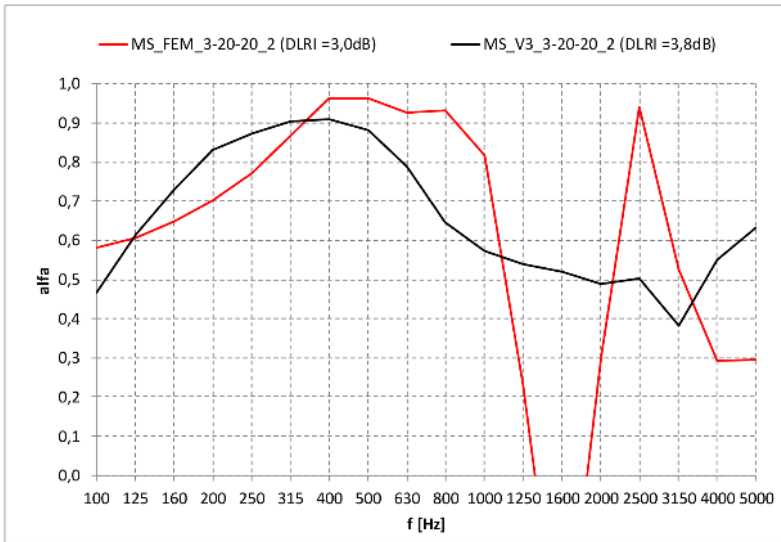
## 6.4. Porównanie zastosowanych metod

Do weryfikacji metod wykorzystano najbardziej złożony przypadek, tzn. moduł fotowoltaiczny umieszczony jest na stronie pochłaniającej dźwiękochłonnego ekranu akustycznego. Pomiar przeprowadzono metodą subtrakcyjną wg. normy PN-EN 1793-5 [5], obliczenia wykonano metodą FEM. Poniżej przedstawiono wyselekcjonowane wyniki weryfikacji, które w sposób reprezentatywny charakteryzują przeprowadzoną serię pomiarów dla różnych konfiguracji rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na ekranie akustycznym.

Moduł był umieszczony w różnych odległościach od pochłaniającej strony kasetonowego ekranu akustycznego (od 1 cm do 10 cm). Wyniki obliczeń numerycznych i pomiarów dla modułu w odległości 2 cm od ekranu akustycznego przedstawiono na Rys. 6.5.

Poniżej 1000 Hz można zaobserwować stosunkowo dobrą zgodność właściwości dźwiękochłonnych uzyskanych za pomocą modelu numerycznego i metodą pomiarową, a mianowicie występują rezonans pochłaniania o podobnej wartości współczynnika  $\alpha$  i porównywalnym kształcie jego charakterystyki częstotliwościowej. Dla większych częstotliwości natomiast obserwuje się dużą różnicę pomiędzy wynikami uzyskanymi numerycznie i pomiarowo. Z jednej strony jest zachowana tendencja zmian współczynnika pochłaniania względem częstotliwości, np. występuje także drugi rezonans dla 2500 Hz, nato-

miast jest duża rozbieżność w wartościach współczynnika  $\alpha$ . Wartości wskaźnika  $DL_{RI}$  z kolei różnią się tylko o 0,8 dB.



Rys. 6.5. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku zmierzony dla modułu MS\_V3\_3-20-20\_2 oraz obliczony metodą FEM

## 6.5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodykę wyznaczania właściwości dźwiękochłonnych ekranów akustycznych z zamocowanymi modułami fotowoltaicznymi. Porównano właściwości dźwiękochłonne ekranów z PF uzyskane metodami obliczeniowymi i metodą pomiarową dla wybranych prototypów ekranów. Wykazano zadowalającą zgodność wyników modelowania z wynikami pomiarów dla wybranych sposobów rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na ekranach akustycznych.

*Publikacja opracowana w ramach realizacji projektu pt. „Samoczyszczące, wydajne panele fotowoltaiczne na podłożu elastycznym zintegrowane z ekranem akustycznym i inteligentnym systemem sterowania” otwartego w ramach konkursu nr 1/4.1.1/2017 Priorytet IV Zwiększenie potencjału naukowo-badawczego Poddziałanie 4.1.1 Strategiczne programy badawcze dla gospodarki, Wspólne Przedsięwzięcie BRIK (Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej).*

## Bibliografia

- [1] R. Bolejko, *Calculation of sound absorption of Helmholtz resonators by numerical methods*, w: *Acoustics, acoustoelectronics and electrical engineering*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2021.

- [2] P. Dziechciński, *Pomiary wskaźnika odbicia dźwięku, Postępy badań w inżynierii dźwięku i obrazu, Nowe trendy i zastosowania technologii dźwięku wielokanałowego*, EXIT 2021.
- [3] B. Rudno-Rudzińska, P. Dziechciński, P. Plaskota, *Absorbing properties of noise barriers measured by different methods*, w: *Acoustics, acoustoelectronics and electrical engineering*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2021.
- [4] PN-EN 16272-1:2013 Kolejnictwo. Tor. Ekran akustyczny i obiekt oddziałujący na rozchodzenie się dźwięku w powietrzu. Metoda badawcza do określania właściwości akustycznych. Część 1: Cechy charakterystyczne – Badania laboratoryjne pochłaniania dźwięku rozchodzącego się w powietrzu.
- [5] PN-EN 1793-5:2016-05+AC:2018-08 Drogowe urządzenia przeciwhałasowe. Metoda oznaczania właściwości akustycznych. Część 5: Właściwości wewnętrzne – Wartości odbicia dźwięku w warunkach bezpośredniego pola akustycznego w miejscu zamontowania.
- [6] PN-EN 1793-3:2001 Drogowe urządzenia przeciwhałasowe. Metoda oznaczania właściwości akustycznych. Część 3: Znormalizowane widmo hałasu drogowego.
- [7] PN-EN 16272-3-2:2014-10 Kolejnictwo. Tor. Ekran akustyczny i obiekt oddziałujący na rozchodzenie się dźwięku w powietrzu. Metoda badawcza do określania właściwości akustycznych. Część 3-2: Stosowanie znormalizowanego widma hałasu wywołanego przez pojazdy kolejowe i wskaźników jednoliczbowych do oceny dźwięku emitowanego bezpośrednio.



## Rozdział 7

# Curve squeal – how is it influenced by different conditions? Statistical analysis of the noise generated at curves on the Stockholm metro

Anna Świerkoska

*Lukasiewicz Research Network – Railway Vehicles Institute “TABOR” in Poznań*

e-mail: [anna.swierkoska@tabor.lukasiewicz.gov.pl](mailto:anna.swierkoska@tabor.lukasiewicz.gov.pl)

### 7.1. Introduction

Curve squeal is generated while curving as a result of vibrations induced by the wheel – rail contact at the low rail. On one hand this annoying tonal noise is such familiar as railway networks are often located in densely populated areas, but on the other hand there is still an urgent need to increase the understanding of this phenomenon and to deepen the knowledge about how its occurrence is influenced by different conditions in order to develop effective mitigation measures. This paper shortly presents the results of the project *Curve squeal monitoring on the Stockholm metro. Statistical analysis based on data collected by an onboard monitoring system* that was MSc dissertation [1].

### 7.2. About the project

Data for the project was collected by the track condition monitoring system used at the Stockholm metro (SL) and reported in the associated cloud service provided by the consultancy firm Tyréns under the product name “Quiet Track Monitoring System (QTMS)” which has its origin in the European financed project “Quiet track”. The objective of this project was to develop an efficient and optimised track maintenance by continuous monitoring of sound pressure level and acceleration [1, 5].

The project consisted of two parts. The first part was a screening assessment. Its purpose was to analyse data concerning squeal events, detected on the green line of the Stockholm metro by the track condition monitoring system reported in the cloud service.

In the second part, a logistic regression model was developed based on the raw measurement data concerning selected curves highly exposed to squeal. The raw data provided by the QTMS consists of five-minutes recordings in the compressed audio format FLAC (Free Lossless Audio Codec). Linked to each audio recording a Matlab file was created including time, vehicle speed, curve squeal classification and location given as the distance from the reference station in meters and GPS coordinates. In addition, documentation about track alignment, location inside or outside the tunnels and potential application of

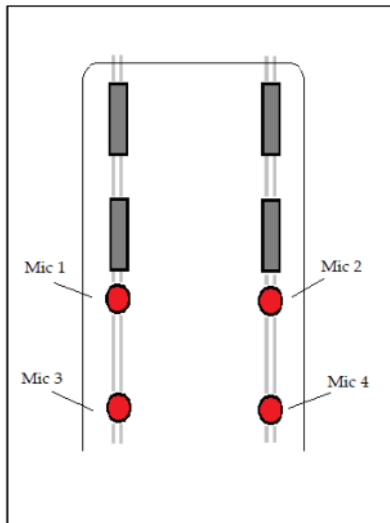
lubrication was provided by SL. Meteorological data includes temperature and humidity measured every hour at the station Stockholm – Bromma Airport.

The algorithm used by the track condition monitoring system detects squeal when the following conditions are fulfilled [1]:

- a vehicle is negotiating a curve;
- sound pressure level exceeds 95 dB (a vehicle is running);
- the noise radiation is dominated by the inner wheel-rail contact: sound pressure level at the inner wheel exceeds that at the outer wheel by at least 3 dBA.

Curve squeal is assumed to be generated only by the inner wheel-rail contact. Hence, the final condition implies that squeal radiated from the outer wheel (flange squeal) is not counted as an “squeal event” by the system.

The microphone setup is presented in Fig. 7.1. In case the instrumented bogie is leading, two microphones are located close to the trailing axle (Mic 1 and Mic 2) and two microphones are mounted at a distance from this wheelset, in the middle of the car between two bogies (Mic3 and Mic 4), see Fig. 7.1. Noise recorded with microphones 1 and 2 is of particular interest in the current project, as it corresponds to the wheel/ rail contact. The microphone sensitivity is 50 mV/Pa.



**Fig. 7.1.** Microphone setup

Specification of curves that were selected for the detailed analysis is presented in Tab. 7.1. Both selected curves are marked on the map in Fig. 7.2.

### **7.3. What does a curve squeal look like? Closer look into squeal events**

Squeal is a tonal noise of high pressure levels dominated by a single frequency that may differ between various experiments. Tonal components of squeal are typically found in the range between 250

Hz to 5 kHz [2], which means that they are always in the range at which human hearing is the most sensitive.

**Table 7.1**  
Curves selected for the detailed analysis

| Curve | Curve location  | Radius in m | Length in m | Speed limit in km/h | High-rail lubrication                     | Location inside/outside a tunnel | Traffic                                |
|-------|---|-------------|-------------|---------------------|---|----------------------------------|--|
| 1     | Northbound track, between stations Alvik – Stora mossen | 122,6       | 120,6       | 40                  | Not applied                               | outside                          | C20 trains (Bombardier Transportation) |
| 2     | Northbound track, between stations Alvik – Stora mossen | 318,0       | 175,0       | 45                  | Applied ca.1000 m before the curve starts | outside                          | C20 trains (Bombardier Transportation) |

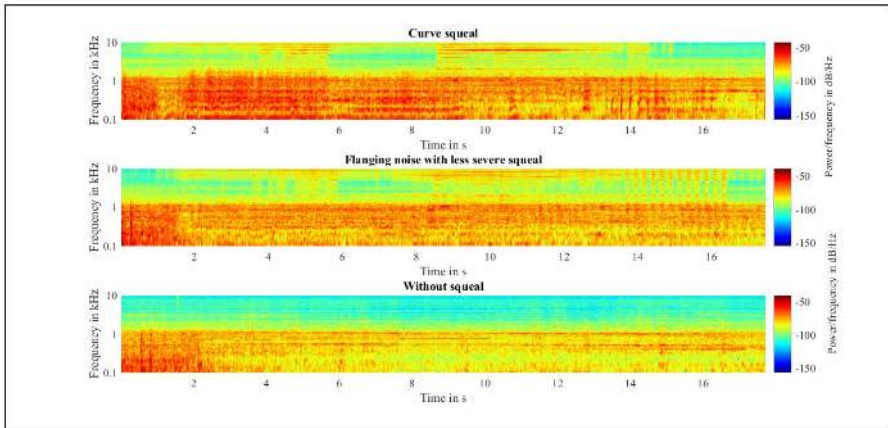


**Fig. 7.2.** Curves with radius 122.6 m (Curve 1, light green) and 318 m (Curve 2, dark green) selected for the detailed analysis marked on the map

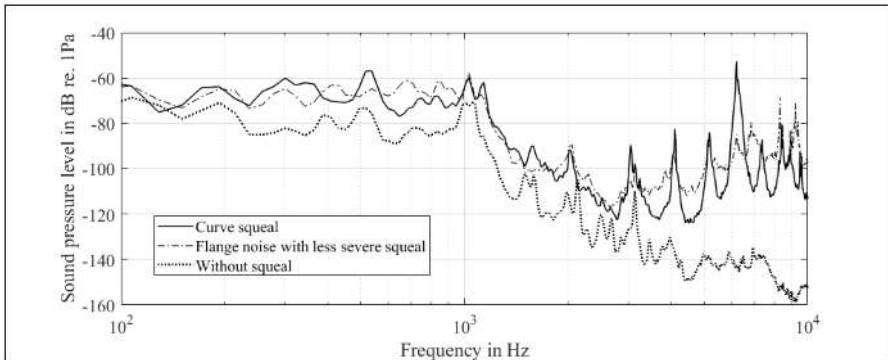
Considering mentioned above, squeal may be regarded as one of the most annoying noise emitted by the railway system. The generation of squeal depends on plenty of factors. In different experiments it varies in sound pressure level, tonal components and time characteristics. Curve squeal is intermittent meaning that the noise ceases and starts again during a single event. The described characteristics of squeal may be seen in Fig. 7.3 – 7.7, that represent noise recorded during different passages by the QTMS. Detailed information about time, speed or weather condition are described in [1].

Fig. 7.3 and 7.4 show three different passages through the same curve with radius 122,6 m (Curve 1, Tab. 1). For the passage with curve squeal, squealing frequency is at 1030 Hz, but the maximum noise level is measured for the higher harmonic at 6.2 kHz. The difference in the noise level measured for the presented passages with and without curve squeal is equivalent to ca. 6 dBA. In the middle spectrogram, flanging noise is shown, typically generated at the high rail. This is more broadband noise, covering frequencies usually above 5 kHz [1, 3], which is seen in Fig. 7.3, as higher noise levels are measured in the range above 6 kHz. Below this frequency, another relevant observation is illustrated in Fig. 7.4. Frequency characteristics of the squeal generated during two different passages, by the same vehicle

and through the same curve coincide. The difference in temperature during these passages might be negligible (7.4 and 7.8°C), in speed it was 1.8 km/h (35.5 km/h for passage with curve squeal and 33.7 km/h for the second squealing event). There was 3.6 mm of rain and humidity of 83% on the day with the first presented squealing event (curve squeal) and no precipitation and humidity of 70% for the second one.



**Fig. 7.3.** Spectrogram of noise measured during three different passages through the 122.6 m radius curve between Alvik and Stora mossen [1]



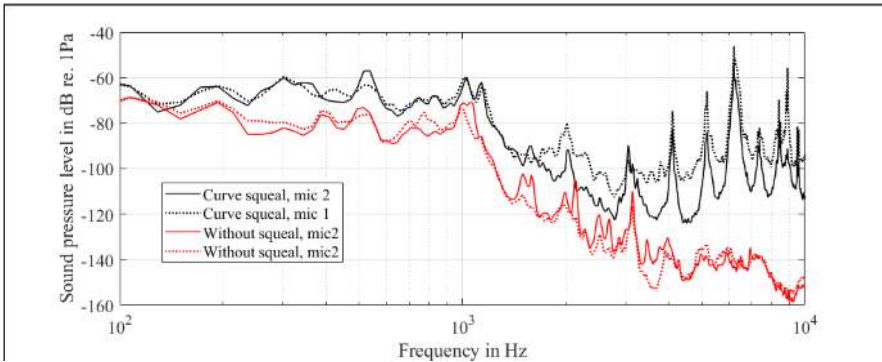
**Fig. 7.4.** Spectra of noise measured during three different passages through the 122.6 m radius curve between Alvik and Stora mossen [1]

Figure 7.5 shows differences in sound pressure levels measured with microphones located close to the inner and outer wheel during the same passage with curve squeal (in the range above the squealing frequency). There is no such difference observed when squeal is not generated.

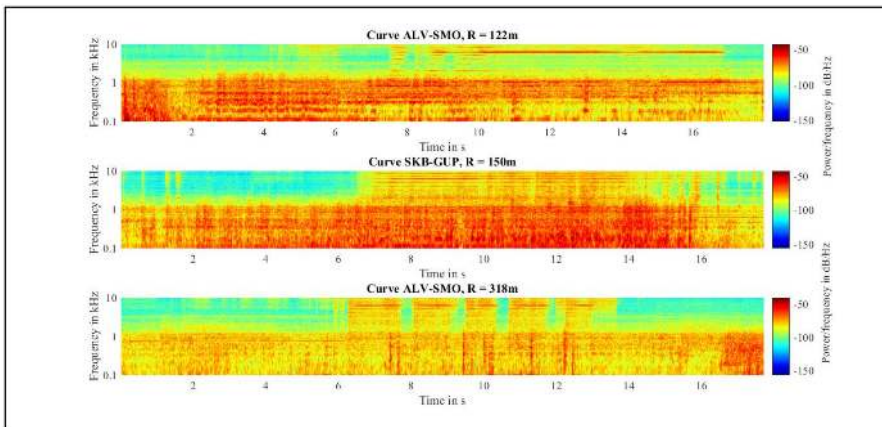
Noise containing curve squeal measured during passages through three different curves (Curve 1 and 2 from Table 1 and a curve with radius of 150 m between stations Gullmarsplan and Skärmarbrink is presented in Fig. 7.6 and 7.7. Although, time characteristics that may be seen in Fig. 7.6 diverge, the frequency characteristics shown in Fig. 7.7 is almost identical for curve squeal generated by the same



vehicle at 3 different curves and at different conditions (i.e. temperature ranging from  $-7.8$  to  $+15.1^{\circ}\text{C}$ , speed from  $28.5$  to  $36.5$  km/h).



**Fig. 7.5.** Spectra of noise measured during 2 different passages through the 122.6 m radius curve between Alvik and Stora mossen [1]

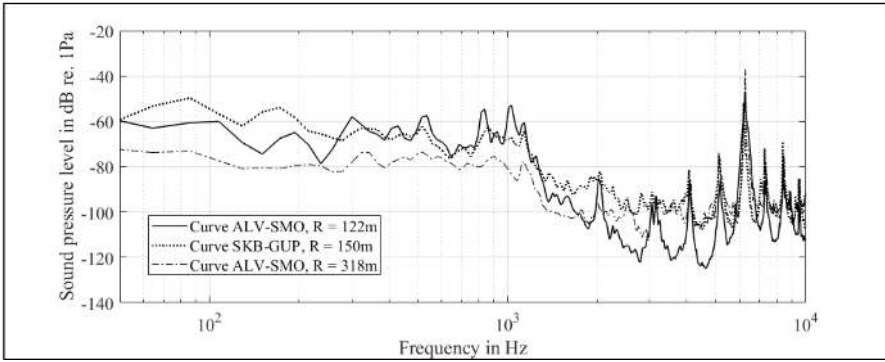


**Fig. 7.6.** Spectrogram of noise measured during three different passages through 122.6 m, 150 m and 318 m radius curves [1]

## 7.4. Screening assessment

The results presented in this part are based on data collected on the green line of the Stockholm metro during the period from September 23, 2017 to September 23, 2018. Data presented here is sampled per 25 long track segment, which is referred to as track section and include curve squeal events detected on the northbound track of the green line.

The number of curve squeal events as a function of curve radius sorted into 6 categories, see Tab. 7.2 [1], is presented in Fig. 7.8. Normalised number of squeal events refers to the number of the total detected number of squeal events in each category divided by the corresponding number of sections.

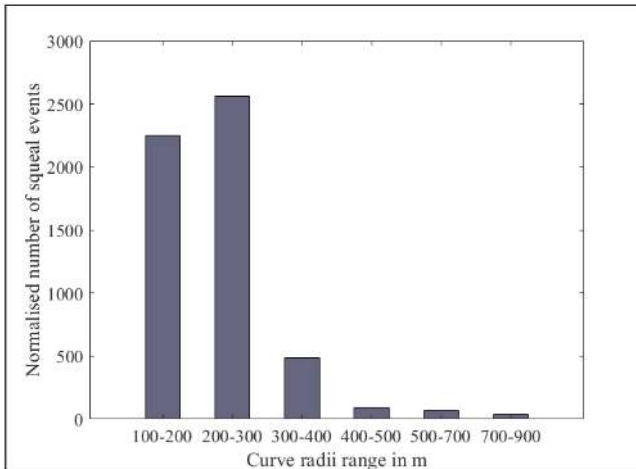


**Fig. 7.7.** Spectra of noise measured during three different passages through 122.6 m, 150 m and 318 m radius curves [1]

**Table 7.2**

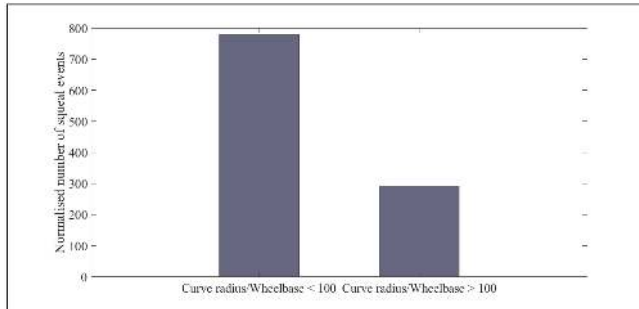
Curve radius categories used for the screening analysis [1]

| No. | Curve radius in m | Number of curves in category |
|-----|-------------------|------------------------------|
| 1   | 100 - 200         | 5                            |
| 2   | 200 - 300         | 14                           |
| 3   | 300 - 400         | 44                           |
| 4   | 400 - 500         | 20                           |
| 5   | 500 - 700         | 48                           |
| 6   | 700 - 900         | 32                           |



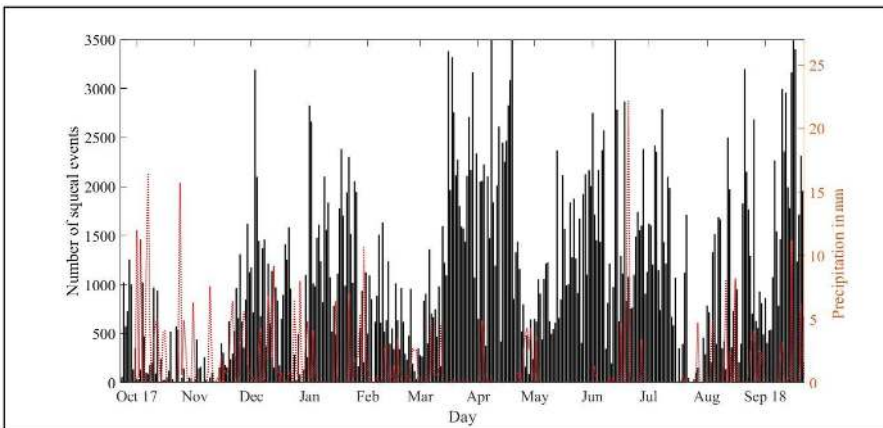
**Fig. 7.8.** Curve squeal events on the green metro line measured during the period 2017-09-23 – 2018-09-23 as a function of curve radius sorted into categories

The results show the obvious impact of the track geometry on the generation of squeal – the number of squeal events increases with the decreasing curve radius. The study [1] also shows that curve squeal is generated at curves with radii up to 900 m, however, the number of curve squeal events reduces significantly for the curves with radius larger than 230 m, see Fig. 7.9.



**Fig. 7.9.** Normalised number of squeal events on the green metro line measured during the period 2017-09-23 – 2018-09-23 and categorised according to track and vehicle geometry. Bogie wheelbase in Bombardier C20 metro train is 2.3 m [1]

The investigation on the influence of meteorological conditions on the generation of squeal shows particularly the reduction in number of squeal events during the days with precipitation (861.5/day) compared to days with no precipitation (1224.6/day), see Fig. 7.10.



**Fig. 7.10.** Number of squeal events per day on the green metro line measured during period 2017-09-23 – 2018-09-23 and the sum of day precipitation [1]

Curve location outside or inside the tunnel and application of the high rail lubrication were not found to be factors indisputably promoting or reducing squeals. Fig. 7.11 indicates lower number of squeal events outside tunnels (note: there was no curve inside the tunnel in category 1) and this is the most probably due to precipitation. Lubrication is often applied at curves with smaller radius that are more exposed to wear and also squeal [1], therefore there might be seen an increased number of squeal events at curves with lubrication applied in results shown in Fig. 7.12. The normalised number of squeal

events in Fig. 7.11 and 7.12 is with respect to the number of sections inside/outside of tunnels and with/without lubrication.

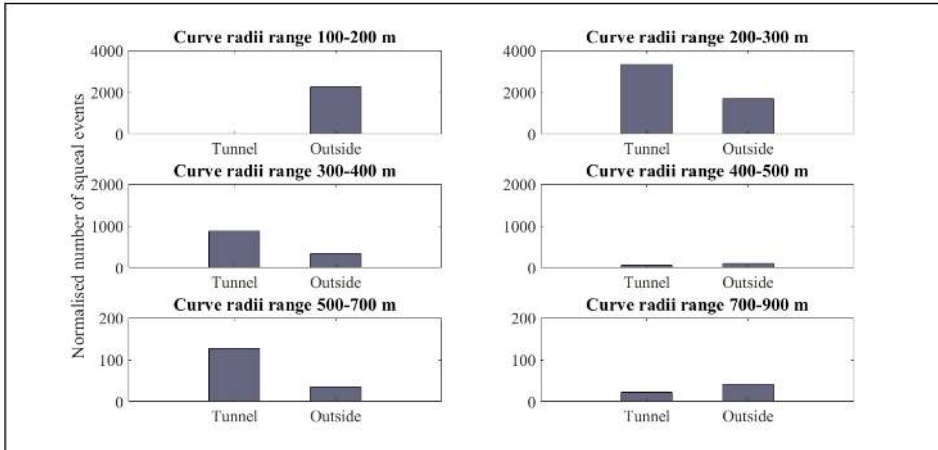


Fig. 7.11. Curve squeal generated inside and outside of tunnels [1]

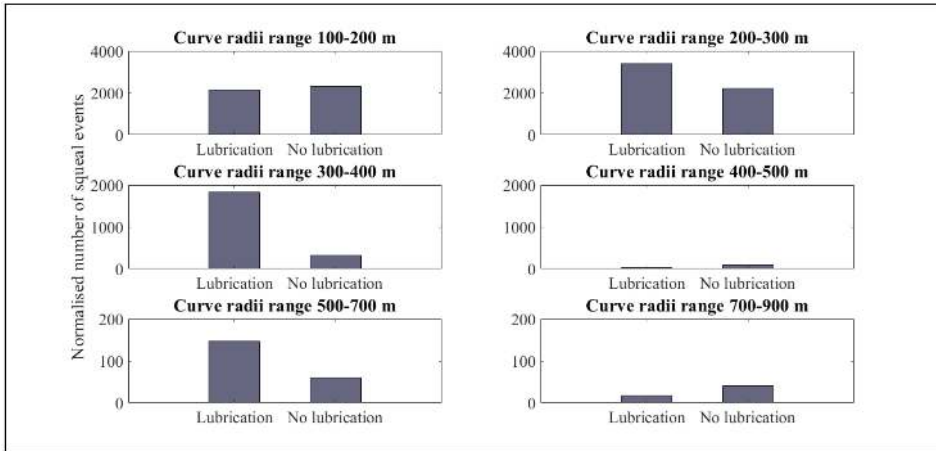
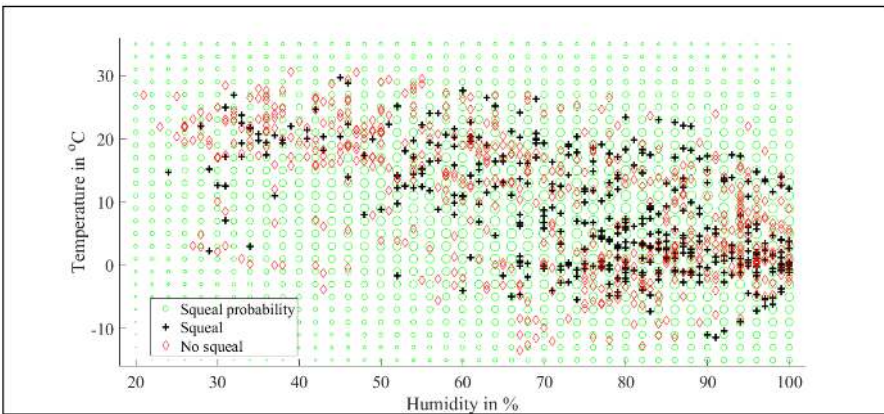


Fig. 7.12. Curve squeal generated at curves with and without high rail lubrication applied [1]

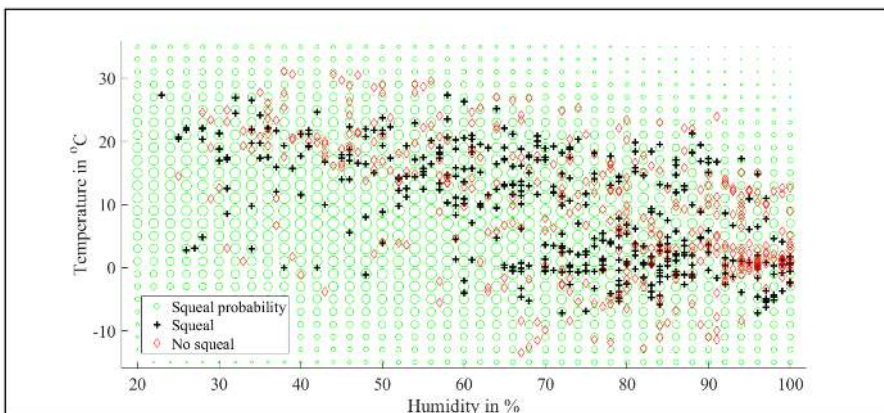
## 7.5. Prediction model – detailed investigation

The raw data provided by QTMS and collected during the period August 25, 2017, to November 30, 2018 at 2 chosen curves of the green metro line of SL, see Tab. 1, enabled to perform logistic regression analysis and the prediction model was created. Data was divided into train set (the model was developed

based on this set) and test set (the model was tested using this set). The probability of squeal was initially modelled using three predictor variables, i.e. air humidity, air temperature and vehicle speed. However, the analysis showed that the latest parameter is insignificant. The logistic regression model was implemented using software R. The detailed information about data sets, detailed description and mathematical explanation of the model are included in the thesis report [1]. Actually, in the project [1], two models were developed that differs in the number of predictors and consequently, the function that is applied. The accuracy of both models is around 60%. Here, the results obtained with model.b [1] are presented. In Fig. 7.13 and 7.14, the probability of squeal is illustrated with size of circles of the green grid, i.e. larger size of a circle means greater estimated probability for the given humidity and temperature conditions.

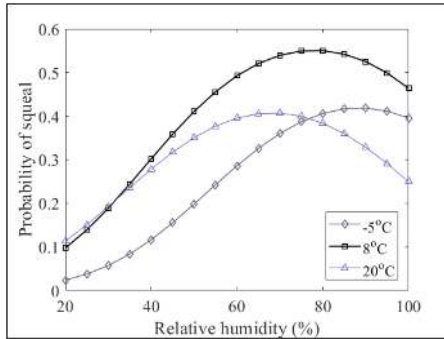


**Fig. 7.13.** Squeal probability obtained with the logistic regression model (model.b) developed for the train data set collected at Curve 1 during the time period 2017-08-25 – 2018-11-30. Train data samples presented in red and black [1]

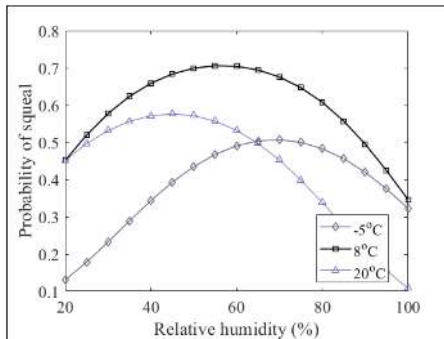


**Fig. 7.14.** Squeal probability obtained with the logistic regression model (model.b) developed for the train data set collected at Curve 2 during the time period 2017-08-25 – 2018-11-30. Train data samples presented in red and black [1]

The further investigation led to an observation that squeal probability generally increases with increasing humidity in case of the curve with radius 122.6 m, see Fig. 7.15, but the same analysis in case of the curve with 318 m radius does not show such relation, see Fig. 7.16. For both curves squeal occurrence is increased in moderate temperatures, especially between 4 and 16°C, see Fig. 7.17 and 7.18.



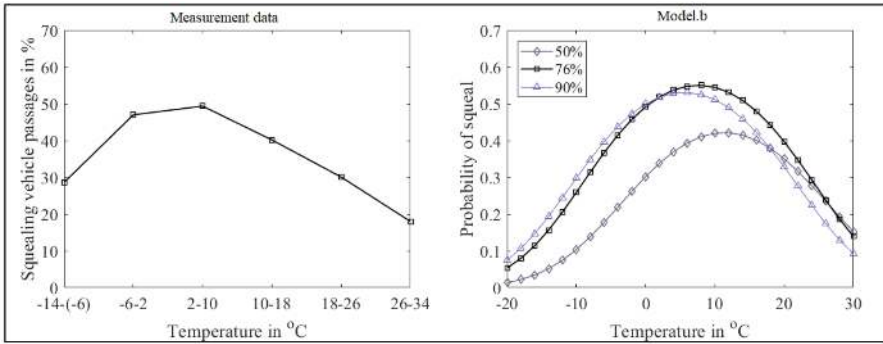
**Fig. 7.15.** The modelled relation between humidity and curve squeal probability for three different air temperatures, obtained with the logistic regression model (model.b) developed for the train data set collected at Curve 1 during the time period 2017-08-25 – 2018-11-30 [1]



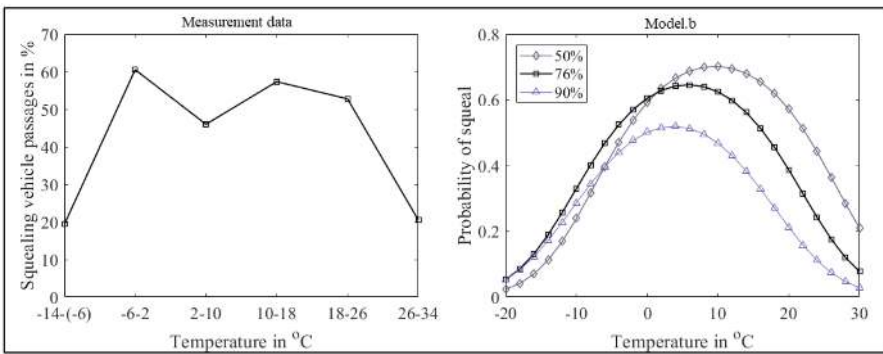
**Fig. 7.16.** The modelled relation between humidity and curve squeal probability for three different air temperatures, obtained with the logistic regression model (model.b) developed for the train data set at Curve 2 during the time period 2017-08-25 – 2018-11-30 [1]

## 7.6. Conclusions

This work presents chosen results from the project [1] that was a start for the further investigation on how curve squeal is influenced by different conditions. The analysis showed features of curve squeal (Fig. 7.3 – 7.7), revealing that squeal noise may be consistent in terms of frequency characteristics although generated at different curves in different conditions, by the same vehicle. The obvious relation between the increased occurrence of squeal with decreasing curve radius was presented (Fig. 7.8).



**Fig. 7.17.** The measured relation between the air temperature and squal occurrence based on the full data set and modelled relation between the air temperature and squal probability for three different relative humidity values obtained with the logistic regression model developed for the train data set collected at Curve 1 during the time period 2017-08-25 – 2018-11-30 [1]



**Fig. 7.18.** The measured relation between the air temperature and squal occurrence based on the full data set and modelled relation between the air temperature and squal probability for three different relative humidity values obtained with the logistic regression model developed for the train data set collected at Curve 2 during the time period 2017-08-25 – 2018-11-30 [1]

Due to the criterion described by Remington [4], curve squal should not occur for cases when the ratio between curve radius and bogie wheelbase is larger than 100. The significant reduction in number of squal events is observed for curve radius and wheelbase ratio greater than 100.

However, in the current study, curve squal was found to still occur at curves with radius up to 900 m. The presented influence of precipitation and air humidity on the occurrence of curve squal may indicate wheel-rail friction coefficient to have a crucial role in the generation of squal [1]. The prediction model might also provide a closer view on how the generation of squal is influenced by different parameters, especially when significant predictor variables are chosen. In this study, the logistic regression model is able to predict whenever curve squal occur or not based on air temperature and humidity with ca. 60% accuracy, which is slightly better than a chance (corresponding to 50%). Results predicted with the model should be used with caution outside the areas with plenty of train data samples [1].

## Bibliography

- [1] A. Świerkoska, *Curve squeal monitoring on the Stockholm metro. Statistical analysis based on data collected by an onboard monitoring system*, MSc dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2019.
- [2] D. J. Thompson, *Curve Squeal Noise*, in D. J. Thompson, *Railway Noise and Vibrations: Mechanisms, Modelling and Mitigation*, Elsevier, Oxford, 315 – 342, 2009.
- [3] D. Eadie, M. Santoro, J. Kalousek, *Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions*, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 2003.
- [4] P. J. Remington, *Wheel/rail squeal and impact noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here?*, *Journal of Sound and Vibration*, 116 (2), 339–353, 1987.
- [5] <https://cordis.europa.eu/project/rcn/109752/factsheet/en> [17.06.2021]



## Rozdział 8

# Sprawdzenie spełnienia wymagań normatywnych dotyczących wyposażenia i warunków przeprowadzenia badań tłumienia dźwięku ochronników słuchu

Emil Kozłowski, Rafał Młyński

*Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy,  
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa*

e-mail: [emkoz@ciop.pl](mailto:emkoz@ciop.pl)

Tłumienie dźwięku ochronników słuchu jest podstawowym parametrem określającym ich właściwości tłumienne. Informacja o wartościach tłumienia dźwięku jest niezbędna podczas doboru ochronników słuchu. Na podstawie wartości tłumienia dźwięku oraz parametrów hałasu na stanowisku pracy można obliczyć jaki będzie występował poziom dźwięku A pod ochronnikami słuchu. Tłumienie dźwięku ochronników słuchu wyznacza się zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 4869-1:2018-12, która zastąpiła funkcjonującą przez wiele lat normę PN-EN 24869-1:1999. W normach tych zawarte są wymagania odnośnie wyposażenia pomiarowego oraz przestrzeni pomiarowej w której przeprowadza się pomiary tłumienia dźwięku ochronników słuchu. W pracy przedstawiono pomiary weryfikujące spełnienie wymagań określonych w normie PN EN ISO 4869-1:2018-12 przez używane w CIOP-PIB wyposażenie pomiarowe oraz warunki panujące w kabinie służącej do badań ochronników słuchu.

## 8.1. Wprowadzenie

Zadaniem ochronników słuchu tj. wkładek i nauszników przeciwhałasowych jest zabezpieczenie narządu słuchu osób tak, aby po ich prawidłowym stosowaniu osoba ekspozowana na hałas nie była narażona na wystąpienie uszkodzenia słuchu. Prawidłowe stosowanie ochronników słuchu, oprócz odpowiedniego ich zakładania wymaga także odpowiedniego ich doboru do hałasu panującego na stanowisku pracy. W Rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. [1] jest mowa, że środki ochrony indywidualnej słuchu są dobierane w sposób eliminujący ryzyko uszkodzenia słuchu lub zmniejszający je do najniższego możliwego do osiągnięcia w danych warunkach poziomu. Dane literaturowe [2] wskazują, że ryzyka uszkodzenia słuchu nie ma, gdy pracownik nie jest ekspozowany na hałas o poziomie dźwięku A powyżej 80 dB. Także w normie PN-EN 458:2016-06 [3] jest określone, że ochronniki słuchu są poprawnie dobrane wtedy, gdy poziom dźwięku A pod tymi ochronnikami słuchu nie przekracza 80 dB. Dodatkowo należy pamiętać, że ochronniki słuchu, które mocno ograniczają hałas, będą równie mocno ograniczać słyszenie sygnałów użytecznych. W takiej sytuacji pracownik

może nie usłyszeć sygnału ostrzegawczego, co w konsekwencji może doprowadzić do wypadku. Z tych względów zaleca się, aby poziom dźwięku A pod ochronnikami słuchu był nie niższy niż 65 dB [3]. Określenie jaki będzie występował w danych warunkach hałasowych poziom dźwięku A pod ochronnikami słuchu jest możliwe poprzez stosowanie obliczeniowych metod doboru ochronników słuchu [3]. W tym celu oprócz przeprowadzenia pomiarów parametrów hałasu na stanowisku pracy należy także znać parametry określające tłumienie ochronników słuchu. Do parametrów tych zalicza się tłumienie dźwięku oraz parametry H, M, L i SNR. Parametry H, M, L i SNR wyznaczone są obliczeniowo m.in. na podstawie wartości tłumienia dźwięku. Wartości tłumienia dźwięku wyznaczone są natomiast pomiarowo, podczas przeprowadzania badania typu UE na zgodność z zasadniczymi wymaganiami Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 [4]. Producent na podstawie wyników otrzymanych od laboratorium badającego ochronniki słuchu podaje wartości parametrów określających tłumienie ochronników słuchu w informacji dla użytkownika. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników sprawdzenia czy w laboratorium CIOP-PIB spełnione są wymagania określone w normie PN EN ISO 4869-1:2018-12 [5]. Norma ta jest podstawową normą na podstawie której wyznaczone jest tłumienie dźwięku ochronników słuchu. Najnowsze wydanie normy PN EN ISO 4869-1:2018-12 [5] zostało wprowadzone zamiast funkcjonującej wiele lat normy PN-EN 24869-1:1999 [6].

## 8.2. Obiekt i metodyka badań

Sprawdzenie spełnienia wymagań określonych w normie PN-EN ISO 4869-1:2018-12 [5] dotyczy zarówno toru pomiarowego stosowanego do pomiaru tłumienia dźwięku jak i warunków akustycznych panujących w pomieszczeniu, w którym przeprowadza się te pomiary. Stosowanym w CIOP-PIB wyposażeniem do pomiaru tłumienia dźwięku jest system do badania ochronników słuchu Norsonic Nor838 wraz ze wzmacniaczem Rotel RMB-1075 (Rys. 8.1) oraz cztery zestawy głośnikowe JBL4208. Pomiary tłumienia dźwięku przeprowadza się w specjalnie do tego celu przygotowanej kabinie (Rys. 8.2).



**Rys. 8.1.** System służący do pomiarów tłumienia dźwięku Norsonic Nor838 wraz ze wzmacniaczem Rotel RMB-1075



Rys. 8.2. Kabina służąca do pomiarów tłumienia dźwięku

### 8.2.1. Sprawdzenie toru pomiarowego

Pomiary sprawdzające tor pomiarowy przeprowadzane są w pasmach 1/3 oktawowych o częstotliwościach środkowych: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Sprawdzenie toru pomiarowego służącego do pomiaru tłumienia dźwięku polega na określeniu:

- Zakresu liniowości zmian zmierzonego poziomu sygnału generowanego w odniesieniu do zmian nastaw poziomu sygnału w aparaturze generującej. Badanie liniowości odbywa w oparciu o pomiary poziomu ciśnienia akustycznego sygnału odtwarzanego w polu akustycznym lub w oparciu o pomiary parametrów sygnału elektrycznego na zaciskach zestawów głośnikowych. Zakres pracy tłumika sygnału powinien wynosić co najmniej 90 dB w przypadku każdego sygnału testowego. Rozbieżność pomiędzy spodziewaną zmianą poziomu sygnału akustycznego lub elektrycznego, wynikającą ze zmiany nastawy tłumika, a wartością zmierzoną w całym przeznaczonym do wykorzystania zakresie zmian nastaw tłumika nie może przekraczać 2 dB. Ponadto nie może ona przekraczać 1 dB w jakimkolwiek zakresie zmian wynoszącym 80 dB.
- Poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach częstotliwości innych niż sygnał testowy tj. w innych, 1/3 oktawowych pasmach częstotliwości, odległych o oktawę i jej wielokrotność, niż pasmo, w którym generowany jest sygnał testowy, w sytuacji największego wzmocnienia ustawionego w torze odtwarzania sygnału. Wartość tego poziomu powinna być mniejsza o co najmniej 40 dB od poziomu sygnału w pasmie zawierającym sygnał testowy. Pomiar poziomu ciśnienia akustycznego przeprowadza się po umieszczeniu mikrofonu pomiarowego w środku obszaru testowego pomieszczenia pomiarowego, w miejscu odpowiadającym głowie słuchacza. Wysokość umieszczenia mikrofonu pomiarowego: 115 cm (skierowany pionowo do góry).

### 8.2.2. Sprawdzenie obszaru testowego

Sprawdzenie obszaru testowego kabiny w której przeprowadza się pomiar tłumienia dźwięku polega na określeniu dyfuzyjności pola akustycznego, czasu pogłosu oraz poziomu ciśnienia akustycznego hałasu tła.

#### Dyfuzyjność pola akustycznego

Zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 4869-1:2018-12 [5] powinny być spełnione dwa poniższe warunki:

- W przypadku każdego sygnału testowego poziom ciśnienia akustycznego, mierzony mikrofonem wszechkierunkowym w punktach oddalonych o 15 cm od punktu odniesienia, na osiach przód-tył, prawo-lewo oraz góra-dół, nie powinien różnić się więcej niż  $\pm 2,5$  dB od poziomu ciśnienia mierzonego w punkcie odniesienia (podczas nieobecności słuchacza). Ponadto, różnica pomiędzy ekstremalnymi punktami na osi prawo-lewo nie powinna przekroczyć 3 dB. Kierunek ustawienia mikrofonu powinien być jednakowy w każdym punkcie pomiarowym. Punktem odniesienia jest ustalone miejsce w obszarze testowym przyjęte tak aby w przybliżeniu odpowiadało środkowi obszaru testowego w płaszczyźnie poziomej i znajdowało się na wysokości 115 cm od podłogi.
- Dla sygnałów testowych o częstotliwościach środkowych 500 Hz i wyższych, różnica między maksymalną i minimalną wartością poziomu ciśnienia akustycznego zmierzoną dla dwóch kierunków orientacji mikrofonu nie powinna przekraczać 20 dB w przypadku mikrofonu o współczynniku kształtu charakterystyki przód-bok wynoszącej nie mniej niż 25 dB, 15 dB przy współczynniku z zakresu 20-25 dB, 10 dB przy współczynniku z zakresu 15-20 dB oraz 5 dB przy współczynniku z zakresu 10-15 dB. Pomiary należy wykonać mikrofonem kierunkowym. Mikrofon powinien być obracany w punkcie odniesienia w płaszczyźnie horyzontalnej w zakresie kąta  $360^\circ$ .

W przypadku pomiarów przeprowadzanych mikrofonem wszechkierunkowym dyfuzyjność pola została wyznaczona za pomocą mikrofonu Brüel & Kjær 4191-L-001, systemu pomiarowego Brüel & Kjær PULSE (moduł 3052-A-30), generatora sygnałów testowych Norsonic Nor838 oraz czterech zestawów głośnikowych JBL4208. W przypadku pomiarów przeprowadzanych mikrofonem kierunkowym wykorzystano mikrofon TONSIL Mc381, który umieszczono na ramieniu obrotowym, magnetofon cyfrowy TASCAM DA-P1, system pomiarowy Brüel & Kjær PULSE (moduł 3052-A-30), generator sygnałów testowych Norsonic Nor838 oraz cztery zestawy głośnikowe JBL4208.

#### Czas pogłosu

Zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 4869-1:2018-12 [5] czas pogłosu w obszarze pomiarowym (podczas nieobecności słuchacza) nie powinien przekroczyć 1,6 s dla każdego z pasm testowych. Czas pogłosu w kabinie pomiarowej został zmierzony za pomocą zestawu pomiarowego składającego się z elementów: analizator dźwięku Brüel & Kjær 2260, wzmacniacz mocy Brüel & Kjær 2716 i źródło dźwięku Brüel & Kjær 4296.

#### Poziom ciśnienia akustycznego hałasu tła

Zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 4869-1:2018-12 [5] poziom ciśnienia akustycznego hałasu tła w obszarze pomiarowym w pomieszczeniu badawczym podczas nieobecności słuchacza nie powinien przekraczać wartości podanych w tabeli 8.1. Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego tła akustycznego przeprowadzono z użyciem niskoszumnego mikrofonu Brüel & Kjær 4179, przedwzmacniacza Brüel & Kjær 2660, wzmacniacza pomiarowego Brüel & Kjær 2636 oraz systemu pomiarowego Brüel & Kjær PULSE (moduł 3052-A-30).

**Tabela 8.1**  
Maksymalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego hałasu tła

| Częstotliwość<br>oktawowego, Hz | średkowa<br>pasma 1/3 | Poziom ciśnienia akustycznego w<br>tercjowych pasmach częstotliwości, dB |
|---------------------------------|-----------------------|--|
|                                 | 63                    | 25   |
|                                 | 80                    | 21   |
|                                 | 100                   | 18   |
|                                 | 125                   | 14   |
|                                 | 160                   | 11   |
|                                 | 200                   | 9  |
|                                 | 250                   | 6  |
|                                 | 315                   | 4  |
|                                 | 400                   | 3  |
|                                 | 500                   | 2  |
|                                 | 630                   | 1  |
|                                 | 800                   | 1  |
|                                 | 1000                  | 1  |
|                                 | 1250                  | 1  |
|                                 | 1600                  | 2  |
|                                 | 2000                  | 2  |
|                                 | 2500                  | 1  |
|                                 | 3150                  | -1   |
|                                 | 4000                  | -4   |
|                                 | 5000                  | -2   |
|                                 | 6300                  | 3  |
|                                 | 8000                  | 10   |
|                                 | 10000                 | 20   |

## 8.3. Wyniki

### 8.3.1. Sprawdzenie toru pomiarowego

#### Zakres liniowości

W celu sprawdzenia zakresu liniowości toru pomiarowego przeprowadzono pomiary poziomu napięcia elektrycznego dla czterech kanałów sytemu Norsonic Nor838. W tabelach 8.2-8.5 przedstawiono wartości równoważnego poziomu napięcia elektrycznego wyznaczone dla czterech kanałów sytemu Norsonic Nor838 na zaciskach zestawów głośnikowych.

#### Poziom ciśnienia akustycznego w pasmach częstotliwości innych niż sygnał testowy

W tabeli 8.6 przedstawiono wyniki pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowym pasmie częstotliwości, w którym zlokalizowany jest sygnał testowy  $L$  oraz w pasmach odległych od niego, objętych sprawdzeniem ( $L_L$ ,  $L_R$ ), a także wyznaczone wartości różnic  $\Delta_L$  (największe wskazania poziomu ciśnienia akustycznego  $L_L$  spośród rozpatrywanych pasm o częstotliwościach mniejszych niż pasmo, w którym zlokalizowany jest sygnał testowy) oraz  $\Delta_R$  (największe wskazania  $L_R$  spośród rozpatrywanych pasm o częstotliwościach większych niż wskazania  $L$  w pasmie, w którym zlokalizowany jest sygnał testowy).

**Tabela 8.2**

Równoważny poziom napięcia elektrycznego zamierzonego w kanale 1

| Nastawa tłumika, dB    | Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego, Hz |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 125   | 250   | 500   | 1000  | 2000  | 4000  | 8000  |
| 0                      | 11  | 10,4  | 10,3  | 9,9   | 8,1   | 9,5   | 8,9   |
| -10                    | 1,1   | 0,3   | 0,3   | -0,1  | -1,9  | -0,5  | -1,1  |
| -20                    | -8,8  | -9,5  | -9,5  | -10   | -11,8 | -10,4 | -10,9 |
| -30                    | -18,8   | -19,5 | -19,6 | -20   | -21,8 | -20,4 | -20,9 |
| -40                    | -28,8   | -29,5 | -29,6 | -30   | -31,8 | -30,4 | -30,9 |
| -50                    | -38,8   | -39,6 | -39,6 | -40   | -41,8 | -40,4 | -40,9 |
| -60                    | -48,8   | -49,5 | -49,6 | -50   | -51,8 | -50,4 | -50,9 |
| -70                    | -58,8   | -59,5 | -59,6 | -60   | -61,8 | -60,4 | -60,9 |
| -80                    | -68,8   | -69,5 | -69,6 | -70   | -71,8 | -70,4 | -70,9 |
| -90                    | -78,8   | -79,5 | -79,5 | -79,9 | -81,7 | -80,2 | -80,7 |
| Maksymalna rozbieżność | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,2   |

**Tabela 8.3**

Równoważny poziom napięcia elektrycznego zamierzonego w kanale 2

| Nastawa tłumika, dB    | Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego, Hz |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 125   | 250   | 500   | 1000  | 2000  | 4000  | 8000  |
| 0                      | 11,1  | 10,4  | 10,4  | 10    | 8,2   | 9,5   | 8,9   |
| -10                    | 1,1   | 0,4   | 0,4   | 0     | -1,9  | -0,5  | -1,1  |
| -20                    | -8,8  | -9,4  | -9,5  | -9,9  | -11,7 | -10,3 | -11   |
| -30                    | -18,7   | -19,4 | -19,5 | -19,9 | -21,7 | -20,3 | -20,9 |
| -40                    | -28,7   | -29,4 | -29,5 | -29,9 | -31,7 | -30,3 | -30,9 |
| -50                    | -38,7   | -39,4 | -39,5 | -39,9 | -41,7 | -40,3 | -40,9 |
| -60                    | -48,7   | -49,4 | -49,5 | -49,9 | -51,7 | -50,3 | -50,9 |
| -70                    | -58,7   | -59,4 | -59,5 | -59,9 | -61,7 | -60,3 | -60,9 |
| -80                    | -68,7   | -69,4 | -69,5 | -69,9 | -71,7 | -70,3 | -70,9 |
| -90                    | -78,7   | -79,2 | -79,3 | -79,8 | -81,6 | -80,2 | -80,8 |
| Maksymalna rozbieżność | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,1   |

**Tabela 8.4**

Równoważny poziom napięcia elektrycznego zamierzonego w kanale 3

| Nastawa tłumika, dB    | Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego, Hz |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 125   | 250   | 500   | 1000  | 2000  | 4000  | 8000  |
| 0                      | 11  | 10,4  | 10,3  | 9,9   | 8,1   | 9,6   | 8,7   |
| -10                    | 1,1   | 0,4   | 0,3   | -0,1  | -1,9  | -0,4  | -1,2  |
| -20                    | -8,9  | -9,6  | -9,7  | -10,1 | -11,9 | -10,4 | -11,2 |
| -30                    | -18,9   | -19,6 | -19,7 | -20,1 | -21,9 | -20,4 | -21,2 |
| -40                    | -28,9   | -29,6 | -29,7 | -30,1 | -31,9 | -30,4 | -31,2 |
| -50                    | -38,9   | -39,6 | -39,7 | -40,1 | -41,9 | -40,4 | -41,2 |
| -60                    | -48,9   | -49,6 | -49,7 | -50,1 | -51,9 | -50,4 | -51,2 |
| -70                    | -58,9   | -59,6 | -59,7 | -60,1 | -61,9 | -60,4 | -61,2 |
| -80                    | -68,9   | -69,6 | -69,7 | -70,1 | -71,9 | -70,3 | -71,2 |
| -90                    | -78,9   | -79,4 | -79,6 | -80   | -81,8 | -80,3 | -81,1 |
| Maksymalna rozbieżność | 0,1   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |

**Tabela 8.5**

Równoważny poziom napięcia elektrycznego zamierzonego w kanale 4

| Nastawa tłumika, dB    | Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego, Hz |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 125   | 250   | 500   | 1000  | 2000  | 4000  | 8000  |
| 0                      | 10,9  | 10,3  | 10,3  | 9,9   | 8,1   | 9,5   | 8,7   |
| -10                    | 0,9   | 0,3   | 0,3   | -0,1  | -1,9  | -0,5  | -1,3  |
| -20                    | -8,4  | -9    | -9,1  | -9,4  | -11,2 | -9,8  | -10,6 |
| -30                    | -18,4   | -19   | -19,1 | -19,4 | -21,2 | -19,8 | -20,6 |
| -40                    | -28,4   | -29   | -29,1 | -29,4 | -31,2 | -29,8 | -30,6 |
| -50                    | -38,4   | -39   | -39,1 | -39,4 | -41,2 | -39,8 | -40,6 |
| -60                    | -48,4   | -49   | -49,1 | -49,4 | -51,2 | -49,9 | -50,6 |
| -70                    | -58,4   | -59   | -59,1 | -59,4 | -61,2 | -59,9 | -60,6 |
| -80                    | -68,4   | -69   | -69,1 | -69,4 | -71,2 | -69,9 | -70,6 |
| -90                    | -78,3   | -78,9 | -79   | -79,4 | -81,2 | -79,8 | -80,5 |
| Maksymalna rozbieżność | 0,7   | 0,7   | 0,6   | 0,7   | 0,7   | 0,7   | 0,7   |

**Tabela 8.6**

Wyniki pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w pasmie częstotliwości, w którym zlokalizowany jest sygnał testowy oraz w innych pasmach, a także odpowiadające im wartości różnic  $\Delta_L$  oraz  $\Delta_R$

| Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego, Hz | $L_t$ , dB | $L$ , dB | $L_R$ , dB | $\Delta_L$ , dB | $\Delta_R$ , dB |
|---|------------|----------|------------|-----------------|-----------------|
| 125   | 20,5       | 95,1     | 49,1       | 74,6            | 46,0            |
| 250   | 22,0       | 84,8     | 39,8       | 62,8            | 45,0            |
| 500   | 16,9       | 86,4     | 38,1       | 69,5            | 48,3            |
| 1000  | 20,7       | 91,5     | 42,4       | 70,8            | 49,1            |
| 2000  | 16,9       | 86,2     | 36,2       | 69,3            | 50,0            |
| 4000  | 19,4       | 89,9     | 43,1       | 70,5            | 46,8            |
| 8000  | 16,1       | 86,6     | 41,1       | 70,5            | 45,5            |

## Dyfuzyjność pola akustycznego

Pomiary dyfuzyjności pola akustycznego zostały wykonane mikrofonem wszechkierunkowym skierowanym ku górze, ustawionym w punkcie odniesienia (pośrodku pomieszczenia, w odległości 115 cm od podłogi).

Kolejne cztery pomiary przeprowadzane były przy mikrofonie odsuwającym względem punktu odniesienia w kierunkach przód, tył, prawo, lewo o 15 cm przy zachowaniu wysokości 115 cm. Wykonano także dwa pomiary ze zmianą lokalizacji mikrofonu w pionie (górze i dół) o 15 cm względem położenia z punktu odniesienia. W tabeli 8.7 przedstawiono różnice pomiędzy poziomem ciśnienia akustycznego zmierzonego w punkcie odniesienia a poziomem ciśnienia akustycznego zmierzonego w punktach oddalonych od niego o 15 cm.

W przypadku pomiarów dyfuzyjności pola akustycznego mikrofonem kierunkowym, mikrofon ten był obracany przez elektrycznie napędzane ramię wykonujące pełen obrót. Podczas obrotu mikrofonu w płaszczyźnie pomiarowej rejestrowano szereg widm sygnału. Spośród zarejestrowanych widm, dla każdej częstotliwości pomiarowej, wyszukano największą oraz najmniejszą wartość poziomu ciśnienia akustycznego, licząc w następnym kroku różnicę wartości maksymalnej i minimalnej. Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tabeli nr 8.8.

**Tabela 8.7**

Wyniki pomiarów dyfuzyjności pola akustycznego. F – różnica pomiędzy punktem odniesienia a punktem umieszczonym z przodu, B – różnica pomiędzy punktem odniesienia a punktem umieszczonym z tyłu, L – różnica pomiędzy punktem odniesienia a punktem umieszczonym w lewo, R – różnica pomiędzy punktem odniesienia a punktem umieszczonym na prawo, T – różnica pomiędzy punktem odniesienia a punktem umieszczonym w górze, D – różnica pomiędzy punktem odniesienia a punktem umieszczonym na dole, R-L – różnica pomiędzy punktem umieszczonym z prawej i lewej strony

| Częstotliwość<br>środkowa pasma 1/3<br>oktawowego, Hz | Różnice poziomu ciśnienia akustycznego, dB |      |      |      |      |      |      |
|---|--|------|------|------|------|------|------|
|   | F  | B    | L    | R    | T    | D    | R-L  |
| 125   | -0.3                                       | 0.1  | 0.4  | 0.3  | 0    | 0.1  | -0.1 |
| 250   | 0.1  | -1.9 | -0.2 | 0.2  | -1.3 | -1.2 | 0.4  |
| 500   | 0.2  | -0.9 | 0.3  | 0.2  | -1.5 | -1.6 | -0.1 |
| 1000  | 0.5  | -0.1 | 0.1  | 0.5  | 0.1  | 1.2  | 0.4  |
| 2000  | 0  | 0    | -0.7 | -0.4 | -0.7 | 1.1  | 0.3  |
| 4000  | 0.3  | 0.8  | 0.3  | 0.4  | 0.6  | 0.6  | 0.1  |
| 8000  | -0.1                                       | -0.6 | 0.1  | 0    | -0.1 | 0.4  | -0.1 |

**Tabela 8.8**

Wyniki pomiarów dyfuzyjności pola akustycznego przeprowadzonych mikrofonem kierunkowym

| Częstotliwość<br>środkowa pasma 1/3<br>oktawowego, Hz | Różnica między wartością maksymalną i<br>minimalną zmierzonych wartości poziomu<br>ciśnienia akustycznego, dB |
|---|---|
| 500   | 2,3   |
| 630   | 1,6   |
| 800   | 1,4   |
| 1000  | 1,2   |
| 1250  | 0,8   |
| 1600  | 0,3   |
| 2000  | 0,3   |
| 2500  | 0,8   |
| 3150  | 0,6   |
| 4000  | 0,5   |
| 5000  | 0,9   |
| 6300  | 2,3   |
| 8000  | 1,6   |

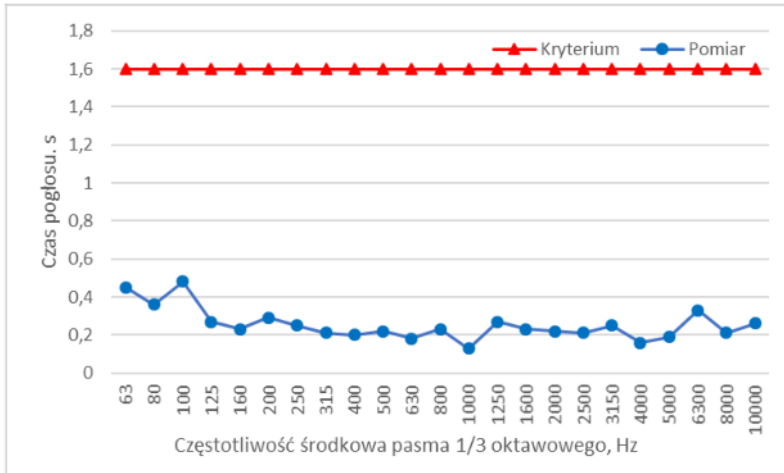
### Czas pogłosu

Na rys. 8.3 przedstawiono wyniki pomiarów czasu pogłosu kabiny w której przeprowadza się pomiary tłumienia ochronników słuchu.

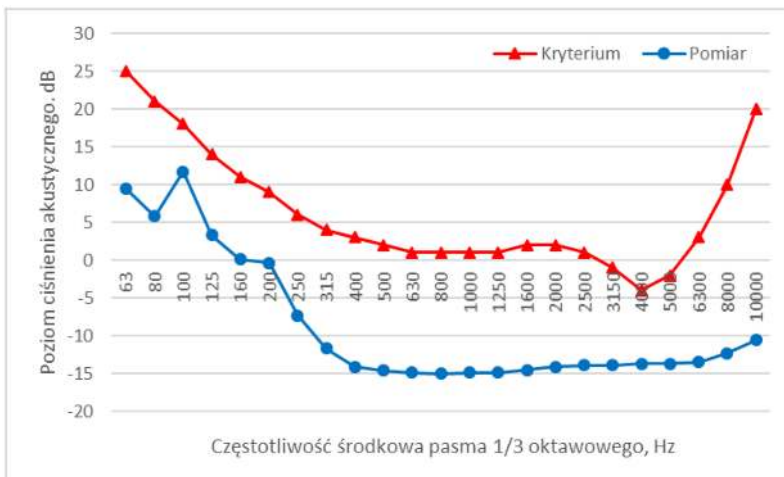
### Poziom ciśnienia akustycznego hałasu tła

Na rys. 8.4 przedstawiono wyniki pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego hałasu tła akustycznego w kabinie służącej do pomiarów tłumienia dźwięku ochronników słuchu.





Rys. 8.3. Zestawienie wyników pomiarów czasu pogłosu w pasmach tercyjnych częstotliwości z wartościami kryterialnymi



Rys. 8.4. Zestawienie wyników pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego hałasu tła w pasmach tercyjnych częstotliwości z wartościami kryterialnymi

## 8.4. Podsumowanie

Wyniki pomiarów liniowości wskazują, że liniowy zakres pracy tłumika systemu służącego do badań tłumienia dźwięku ochronników słuchu, obejmujący wszystkie sygnały testowe (wszystkie 1/3 oktawowe pasma częstotliwości), przyjmuje wymaganą wartość 90 dB oraz zmiana poziomu sygnału testowego nie przekracza 1 dB. Pomiar poziomu ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowych pasmach częstotliwości, w których generowany jest sygnał testowy oraz w pasmach odległych od niego o oktawę i jej wielokrotność wykazały, że odstęp poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach innych niż to, w którym

zlokalizowany jest sygnał testowy jest w każdym przypadku większy niż wymagane 40 dB. Pomiar przeprowadzone mikrofonem wszechkierunkowym wykazały, że w żadnym z punktów pomiarowych znajdujących się w odległości 15 cm od punktu odniesienia, poziom ciśnienia akustycznego nie różnił się względem poziomu zmierzonego w punkcie odniesienia o więcej niż wymagane 2,5 dB. Ponadto w skrajnych punktach umieszczonych po prawej o lewej stronie względem punktu odniesienia poziom ciśnienia akustycznego nie różnił się więcej niż o ustaloną jako kryterium wartość 3 dB. Zmierzony czas pogłosu w żadnym z pasm częstotliwości nie był dłuższy niż wymagane 1,6 s a poziom ciśnienia akustycznego hałasu tła był poniżej ustalonego kryterium. Można zatem uznać, że przeprowadzone pomiary świadczą o spełnieniu określonych w normie PN-EN ISO 4869-1:2018-12 [5] wymagań odnośnie liniowości toru pomiarowego, dyfuzyjności pola akustycznego w obszarze testowym, czasu pogłosu oraz poziomu ciśnienia akustycznego hałasu tła.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy*

## Bibliografia

- [1] Rozporządzeniem Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne (DzU nr 157, poz. 1318).
- [2] A. Dudarewicz, M. Pawlaczyk-Łuszczynska, M. Zamojska, *Minimalizacja ryzyka uszkodzenia słuchu w miejscu pracy*, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź 2010.
- [3] PN-EN 458:2016-06 Ochronniki słuchu – Zalecenia dotyczące doboru, użytkowania, konserwacji codziennej i okresowej – Dokument przewodni.
- [4] Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG.
- [5] PN-EN ISO 4869-1:2018-12 Akustyka – Ochronniki słuchu – Część 1: Metoda subiektywna pomiaru tłumienia dźwięku.
- [6] PN-EN 24869-1:1999 Akustyka – Ochronniki słuchu – Metoda subiektywna pomiaru tłumienia dźwięku.

## Rozdział 9

# Model bariery akustycznej z wykorzystaniem warstwowych struktur kryształów sonicznych

Jan Radosz

*Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa*

e-mail: [jarad@ciop.pl](mailto:jarad@ciop.pl)

W referacie przedstawiono wyniki obliczeń tłumienia wtrącenia modelu bariery akustycznej z wykorzystaniem warstwowych struktur kryształów sonicznych oraz rozkłady poziomów ciśnienia akustycznego wokół tej bariery. W obliczeniach wykorzystano metodę elementów skończonych. Geometria struktury została zdefiniowana na podstawie rzeczywistych widm hałasu przemysłowego. Opracowany model obejmuje kilka mechanizmów tłumienia dźwięku w celu zwiększenia skuteczności i zakresu częstotliwości (rezonans dla niskich częstotliwości, pochłanianie w zakresie średnich i wysokich częstotliwości, oraz rozproszenie również w zakresie średnich i wysokich częstotliwości), w wyniku czego dają możliwość uzyskania tłumienia wtrącenia blisko 30 dB w zakresach występowania dominujących składowych wybranego widma hałasu przemysłowego. Najlepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu warstwowej struktury rozpraszaczy rezonatorowych w połączeniu z materiałem dźwiękochłonnym znajdującym się po zewnętrznej stronie rozpraszaczy. Uzyskano wówczas tłumienie wtrącenia powyżej 20 dB w zakresie 800 – 5000 Hz. Wyniki porównano z innymi modelami barier akustycznej wykorzystujących struktury kryształów sonicznych.

### 9.1. Wprowadzenie

Kryształy soniczne (sonic crystals) z definicji są stałymi periodycznymi wtrąceniami w ośrodku o odpowiedniej różnicy impedancji akustycznej [1].

Najważniejszą ich cechą z punktu widzenia akustyki jest zjawisko występowania tzw. przerw pasmowych – zakresów częstotliwości, w których fala akustyczna nie jest propagowana w strukturze. Zarówno rozmiar jak i położenie przerw pasmowych w widmie zależą od wielu czynników, takich jak kąt padania fali, czy rozmieszczenie rozpraszaczy.

Poszukiwania struktur akustycznych z przerwami pasmowymi rozpoczęły się pracą teoretyczną Sigalasa i Economou w 1992 roku [2]. Wykazali wówczas, że struktura składająca się z periodycznej, trójwymiarowej siatki identycznych sfer o dużej gęstości umieszczonych w ośrodku o niskiej gęstości

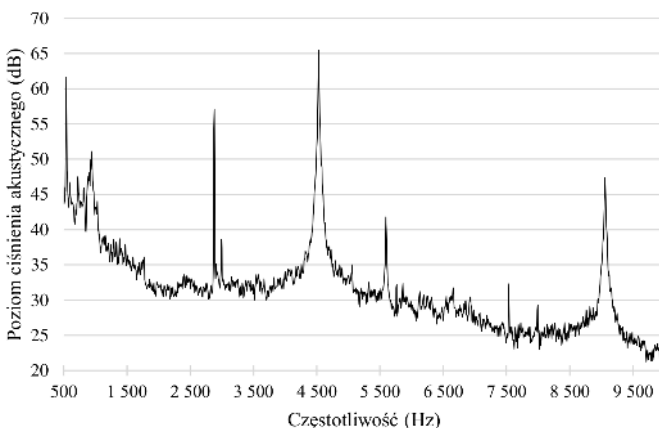
tworzy przerwy pasmowe dźwięku. Od tamtej pory powstało wiele publikacji w tym zakresie. Jedną z pierwszych prac doświadczalnych były badania tłumienia dźwięku przez minimalistyczną rzeźbę autorstwa Eusebio Sempere [3]. Rzeźba składa się z cylindrycznych stalowych prętów o średnicy 29 mm w sieci kwadratowej o stałej sieci krystalicznej równej 100 mm. W badaniach stwierdzono znaczne tłumienie dźwięku dla częstotliwości ok. 1670 Hz. Zdolność kryształów fononicznych do tłumienia hałasu drogowego, lotniczego czy przemysłowego została zademonstrowana w eksperymencie środowiskowym z wykorzystaniem rur PVC o średnicy 160 mm w sieci ukośnej [4]. Uzyskano średnie tłumienie dźwięku 10-20 dB dla częstotliwości od 1000 do 4000 Hz.

Zastosowanie kryształów fononicznych do redukcji hałasu jest stosunkowo młodym i wciąż rozwijającym zagadnieniem naukowym. W zakresie ochrony przed hałasem ostatnie doniesienia naukowe dotyczą m.in. doskonalenia i ujednoczenia metod pomiaru skuteczności struktur kryształów [5,6], zastosowania kryształów fononicznych jako okien [7–9], wykorzystaniu w konstrukcji układów barier materiałów pochodzących z recyklingu [10, 11], wykorzystaniu zjawisk rezonansu do zwiększenia skuteczności tłumienia [12–14].

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie możliwością wykorzystania kryształów fononicznych jako barier dźwiękowych [11, 15–17] ze względu na możliwość uzyskania tłumienia dźwięku sięgającego nawet 25 dB [18,19]. Część prac wciąż jednak dotyczy rozważań teoretycznych i modelowania numerycznego mających na celu rozszerzenie możliwości redukcji hałasu przez struktury kryształów [20–22]. Niemniej jednak bariery wykorzystujące „konwencjonalne” struktury kryształów fononicznych, takie jak np. rozpraszacze cylindryczne w sieci kwadratowej, zapewniają tłumienie jedynie w wąskich pasmach częstotliwości i dlatego nie nadają się do zastosowania w przypadku dźwięków szerokopasmowych. Dlatego też w niniejszej pracy podjęto działania mające na celu rozszerzenie możliwości redukcji hałasu przez struktury kryształów fononicznych oraz zoptymalizowanie ich dla wybranych źródeł hałasu przemysłowego o charakterze wąkopasmowym.

## 9.2. Materiał i metody

Do opracowania założeń geometrycznych modelu bariery akustycznej wykorzystano widmo hałasu przemysłowego przedstawione na rys. 9.1.

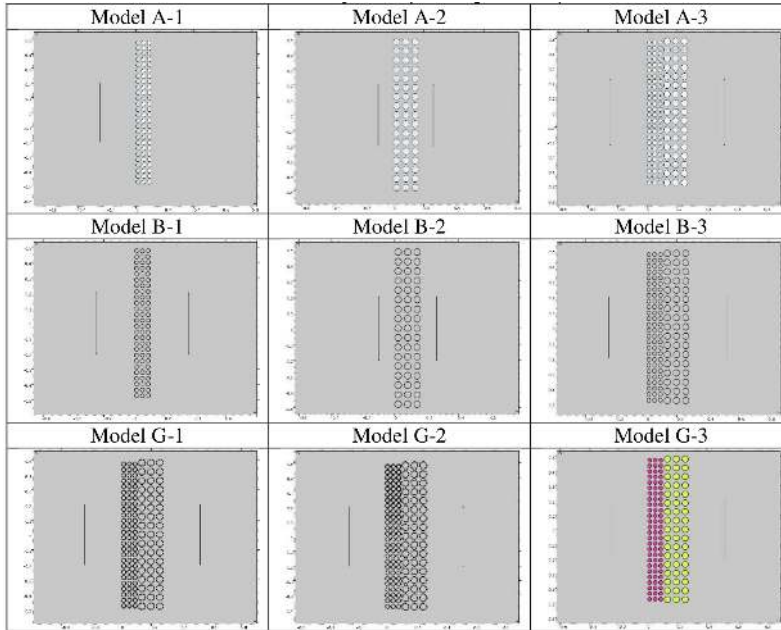


Rys. 9.1. Widmo FFT hałasu przemysłowego

Badania prowadzono przy użyciu całkującego miernika poziomu dźwięku klasy 1 (SVANTEK typ SVAN 979). Pomiaru wykonywano na zewnątrz, na wysokości 1,5 m i w odległości od 5 do 15 m od obiektów emitujących hałas. W czasie pomiarów rejestrowano widmo FFT z zastosowaniem uśredniania liniowego, filtra HP oraz okna Hanninga. Hałas występujący na terenie badanych obiektów miał charakter ustalony.

W widmie tym występują wyraźne składowe wąskopasmowe. Dwie najbardziej znaczące to składowe o częstotliwościach ok. 2900 Hz i ok. 4500 Hz. Na podstawie ww. widma hałasu zaproponowano modele teoretyczne 2D bariery akustycznej przedstawione w tab. 9.1. Założenia geometryczne wyznaczono z prawa Bragga. Podstawowymi elementami struktury są rozpraszacze cylindryczne oraz rezonatory. Wymiary poszczególnych elementów struktury przedstawiono w tab. 9.2. We wszystkich modelach zastosowano kwadratową sieć Bravais'ego. W modelach A zastosowano rozpraszacze cylindryczne natomiast w modelach B rozpraszacze rezonatorowe. W modelach G zastosowano materiał pochłaniający. Przy czym w G-1 i G-2 na zewnątrz rezonatorów, zaś w G-3 wewnątrz rezonatorów.

**Tabela 9.1**  
Założenie geometryczne opracowanych modeli



Dla każdego z modeli przedstawionych w tab. 9.3 przeprowadzono symulacje metodą elementów skończonych (MES) w programie COMSOL Multiphysics obejmujące wyznaczanie tłumienia wtrącenia IL oraz rozkład poziomu ciśnienia akustycznego wokół struktury. Obliczenia wykonano dla pasm 1/3 oktaowych w zakresie 100 – 10000 Hz.

W symulacjach przyjęto siatkę z minimalną wielkością elementów wynoszącą  $6.0E-6$  m oraz maksymalną wielkością elementów wynoszącą  $1/10$  długości fali. W przypadku materiału pochłaniającego zastosowano piankę melaminową, model obliczeniowy Delany-Bazley-Miki oraz oporność przepływu  $R_f$  wynoszącą  $10500 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ . W obliczeniach wykorzystano następujące parametry przedstawione w tab. 9.3.

**Tabela 9.2**  
Wymiary modeli teoretycznych bariery akustycznej

| Model | Średnica zewnętrzna (warstwa 1) | Średnica zewnętrzna (warstwa 2) | Średnica wewnętrzna (warstwa 1) | Średnica wewnętrzna (warstwa 2) | Szerokość szczeliny rezonatora (warstwa 1) | Szerokość szczeliny rezonatora (warstwa 2) | Stala krystaliczna (warstwa 1) | Stala krystaliczna (warstwa 2) | Grubość warstwy pochłaniającej (warstwa 1) | Grubość warstwy pochłaniającej (warstwa 2) | Średnica warstwy pochłaniającej (warstwa 1) | Średnica warstwy pochłaniającej (warstwa 2) |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|--|--|---|---|
| A-1   | 28 mm                           | -                               | -                               | -                               | -  | -  | 38 mm                          | -                              | -  | -  | -   | -   |
| A-2   | 44 mm                           | -                               | -                               | -                               | -  | -  | 60 mm                          | -                              | -  | -  | -   | -   |
| A-3   | 28 mm                           | 44 mm                           | -                               | -                               | -  | -  | 38 mm                          | 60 mm                          | -  | -  | -   | -   |
| B-1   | 28 mm                           | -                               | 24 mm                           | -                               | 4 mm                                       | -  | 38 mm                          | -                              | -  | -  | -   | -   |
| B-2   | 44 mm                           | -                               | 40 mm                           | -                               | 6 mm                                       | -  | 60 mm                          | -                              | -  | -  | -   | -   |
| B-3   | 28 mm                           | 44 mm                           | 24 mm                           | 40 mm                           | 4 mm                                       | 6 mm                                       | 38 mm                          | 60 mm                          | -  | -  | -   | -   |
| G-1   | 28 mm                           | 44 mm                           | 24 mm                           | 40 mm                           | 4 mm                                       | 6 mm                                       | 38 mm                          | 60 mm                          | 3 mm                                       | 5 mm                                       | -   | -   |
| G-2   | 28 mm                           | 44 mm                           | 24 mm                           | 40 mm                           | 4 mm                                       | 6 mm                                       | 38 mm                          | 60 mm                          | 2 mm                                       | 3 mm                                       | -   | -   |
| G-3   | 28 mm                           | 44 mm                           | 24 mm                           | 40 mm                           | 4 mm                                       | 6 mm                                       | 38 mm                          | 60 mm                          | -  | -  | 24 mm                                       | 40 mm                                       |

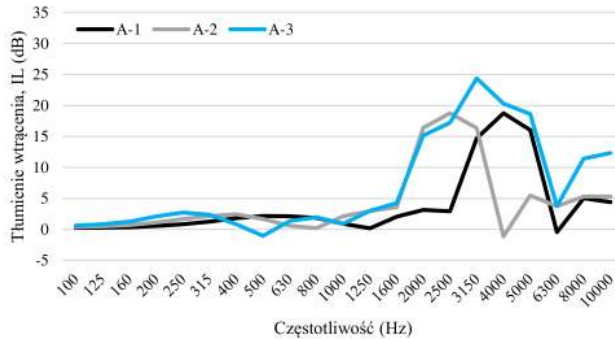
**Tabela 9.3**  
Parametry do obliczeń MES

| Parametr       | Wartość  | Nazwa  |
|----------------|--|--|
| $c_0$          | 343[m/s]   | Prędkość dźwięku w powietrzu                   |
| $\rho_0$       | 1.2[kg/m <sup>3</sup> ]                                | Gęstość powietrza                              |
| $\lambda_{m0}$ | $c_0/f_0$  | Długość fali dla $f_0$ (2000 Hz)               |
| N              | 20   | Liczba wektorów falowych                       |
| $\omega_0$     | $2*\pi*f_0$  | Częstość kąta                                  |
| T              | 293.15[K]  | Temperatura                                    |
| $p_a$          | 1[atm]   | Cisnienie bezwzględne                          |
| $d_{visc}$     | $0.22[\text{mm}]*\sqrt{100[\text{Hz}]/10[\text{kHz}]}$ | Grubość warstwy brzegowej (lepkość) dla 10 kHz |

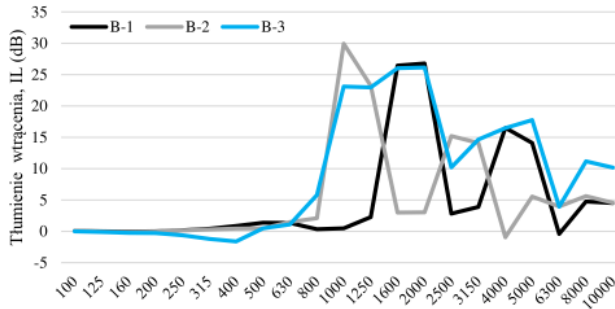
Punktowe źródło dźwięku znajdowało się w odległości 1 m od krawędzi bariery. Wartości tłumienia wtrącenia IL wyznaczono wg poniższej zależności na podstawie zmierzonych wartości poziomów ciśnienia akustycznego w przestrzeni za ekranem  $L_{p,1}$  (w dB) i w przestrzeni bez ekranu akustycznego  $L_{p,2}$  (w dB), przy założeniu takich samych odległości jak w przypadku procedury pomiarowej PN-EN 1793-6:2013.

### 9.3. Wyniki badań

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 9.2-9.4. Zastosowanie w modelu A-3 warstwowych rozpraszaczy cylindrycznych pozwoliło na wy tłumienie głównych składowych wąskopasmowych w rozpatrywanym widmie hałasu przemysłowego (rys. 9.1). W wyniku połączenia dwóch warstw sieci krystalicznej uzyskano większe wartości tłumienia wtrącenia dla 3150 Hz i 5000 Hz sięgające odpowiednio 24,4 dB oraz 18,6 dB. Podobnie w przypadku modeli B. W tabeli 9.4 zestawiono rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego wokół struktury modeli teoretycznych dla pasma 1/3 oktawowego 5000 Hz.

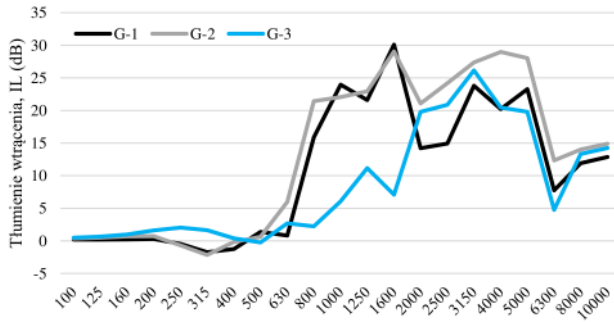


Rys. 9.2. Tłumienie wtrącenia wyznaczone dla modeli A-1 – A-3



Rys. 9.3. Tłumienie wtrącenia wyznaczone dla modeli B-1 – B-3

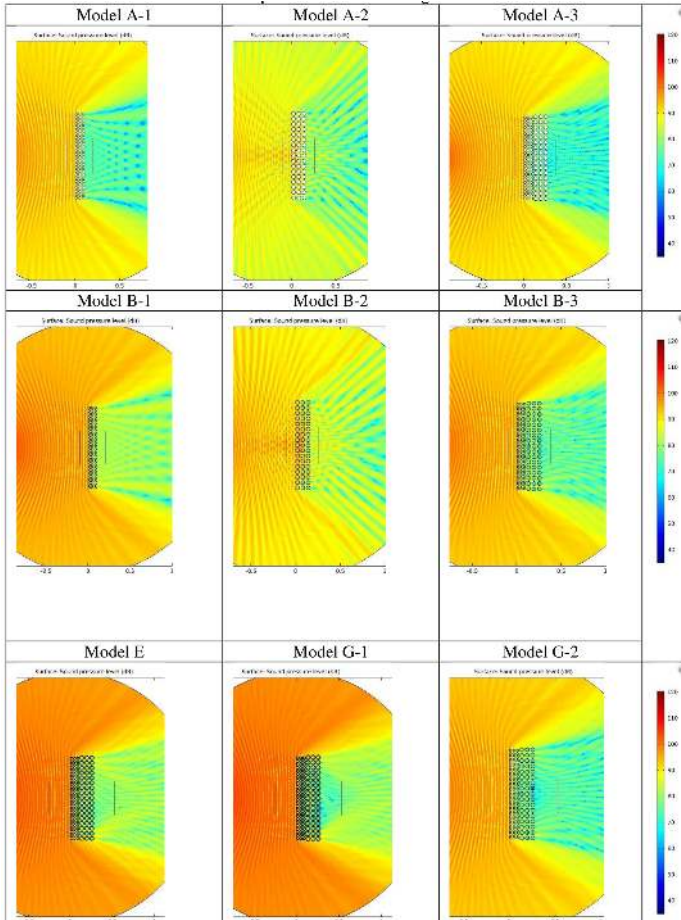
Rozkłady poziomów ciśnienia akustycznego wokół struktury modeli teoretycznych potwierdzają powyższe wnioski (tab. 9.2 i 9.4). W przypadku stosowania rozpraszaczy rezonatorowych można dodatkowo zaobserwować występujące rezonanse w zależności od średnicy rozpraszaczy przy 630 Hz i 1600 Hz. Wprowadzenie do tego układu zewnętrznego materiału pochłaniającego o grubości 3 mm dla warstwy pierwszej i 5 mm dla warstwy drugiej dało jeszcze lepsze rezultaty (model G-2), dzięki czemu uzyskano tłumienie wtrącenia wynoszące powyżej 20 dB w zakresie częstotliwości od 800 do 5000 Hz (rys. 9.3).



Rys. 9.4. Tłumienie wtrącenia wyznaczone dla modeli G-1 – G-3

Tabela 9.4

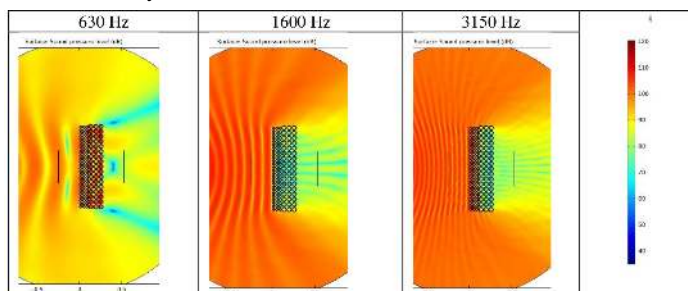
Rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego wokół struktury modeli teoretycznych dla pasma 1/3 oktawowego 5000 Hz





**Tabela 9.5**

Rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego wokół struktury modeli teoretycznych dla pasm 1/3 oktawowych 630 Hz, 1600 Hz oraz 3150 Hz dla modelu G-2



## 9.4. Wnioski i podsumowanie

Stosując metodę elementów skończonych (MES) zamodelowano warunki propagacji dźwięku dla fali cylindrycznej. Rozpraszacze zamodelowano jako wtrącenia o wysokiej sztywności a ich granice zostały określone za pomocą impedancyjnych warunków brzegowych. Rozpatrzono różne warianty geometryczne rozpraszaczy, w tym rezonatory pierścieniowe. Opracowany model teoretyczny (G-2) obejmował kilka mechanizmów tłumienia dźwięku w celu zwiększenia skuteczności i zakresu częstotliwości (rezonans dla niskich częstotliwości, pochłanianie w zakresie średnich i wysokich częstotliwości oraz rozproszenie również w zakresie średnich i wysokich częstotliwości). Zaproponowano również układ warstwowy w celu tłumienia większej ilości wąskopasmowych składowych częstotliwościowych. Opracowany model bariery akustycznej daje możliwość uzyskania tłumienia wtrącenia do blisko 30 dB w zakresach występowania dominujących składowych rozpatrywanego widma hałasu przemysłowego.

Najlepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu wielowarstwowych rozpraszaczy rezonatorowych w połączeniu z materiałem dźwiękochłonnym znajdującym się po zewnętrznej stronie rozpraszaczy. W zakresie 800 – 5000 Hz uzyskano tłumienie wtrącenia powyżej 20 dB.

W porównaniu do tradycyjnych przegród, bariery składające się ze struktur kryształów fononicznych nie mają ciągłej charakterystyki tłumienia. Opracowany model daje duże możliwości redukcji hałasu nie tylko w pasmach częstotliwości, w których przemysłowe źródła hałasu emitują dominującą część energii akustycznej. Na podstawie krytycznych funkcji modelu bariery akustycznej przedstawionych w referacie, w dalszej kolejności zostaną przeprowadzone badania laboratoryjne modelu fizycznego, mające na celu potwierdzenie przewidywań badań teoretycznych.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii.*

*Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

## Bibliografia

- [1] A. Khelif, A. Adibi (edit.), *Phononic Crystals: Fundamentals and Applications*, Springer, New York, 2015.

- [2] M.M. Sigalas, E. N. Economou, *Elastic and acoustic wave band structure*, Journal of Sound and Vibrations, 158, 377–382, 1992.
- [3] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares, F. Meseguer, *Sound attenuation by sculpture*, Nature, 378, 241, 1995.
- [4] J. V. Sanchez-Perez, C. Rubio, R. Martinez-Sala, R. Sanchez-Grandia, V. Gomez, *Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers*, Applied Physics Letters, 81, 5240–5242, 2002.
- [5] F. Morandi, M. Miniaci, P. Guidorzi, A. Marzani, M. Garai, *Acoustic measurements on a sonic crystals barrier*, In: Perino M, editor. 6th Int. Build. Phys. Conf. Ibpc 2015, 78, 134–139, 2015.
- [6] F. Morandi, M. Miniaci, A. Marzani, L. Barbaresi, M. Garai *Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties*, Applied Acoustics, 114, 294–306, 2016.
- [7] H. M. Lee, K. M. Lim, H. P. Lee, *Experimental and numerical studies on the design of a sonic crystal window*, Journal of Vibroengineering, 19, 2224–2233, 2017.
- [8] H. M. Lee, L. B. Tan, K. M. Lim, H. P. Lee, *Experimental study of the acoustical performance of a sonic crystal window in a reverberant sound field*, Building Acoustics, 24, 5–20, 2017.
- [9] S. K. Tang *Reduction of sound transmission across plenum windows by incorporating an array of rigid cylinders*, Journal of Sound and Vibration, 415, 25–40, 2018.
- [10] Q. Wu, C. Cui, T. Bertrand, M. D. Shattuck, C. S. O’Hern *Active acoustic switches using two-dimensional granular crystals*, Physics Review E, 99, 2019.
- [11] M. J. Kim, *Improving sound transmission through triple-panel structure using porous material and sonic crystal*, Archives of Acoustics, 44, 533–541, 2019.
- [12] X. Chen, H. Yao, J. B. Zhao, S. Zhang, Z. H. He, *Study on the Bandgap of Double Local Resonance Helmholtz Phononic Crystals*, Rengong Jingti Xuebao Journal Synth Cryst, 48, 13–17, 2019.
- [13] M. J. Kim, *Numerical study for increasement of low frequency sound insulation of double-panel structure using sonic crystals with distributed Helmholtz resonators*, International Journal of Modern Physics B, 33, 2019.
- [14] J. Radosz, *Acoustic performance of noise barrier based on sonic crystals with resonant elements*, Applied Acoustics, 155, 492–499, 2019.
- [15] J. V. Sánchez-Pérez, C. R. Michavila, S. Castiñeira-Ibáñez, *Towards the development of a software to design acoustic barriers based on Sonic Crystals: An overlapping model*, 2367-2371, 2020.
- [16] H. M. Lee, Z. Wang, K. M. Lim, J. Xie, H. P. Lee, *Novel plenum window with sonic crystals for indoor noise control*, Applied Acoustics, 167, 2020.
- [17] H. Negahdari, S. Javadpour, F. Moattar, *Designing, constructing and testing of a new generation of sound barriers*, Journal of Environment Health Science and Engineering, 17, 507–527, 2019.
- [18] J. V. Sanchez-Perez, *Sound Attenuation by a Two-Dimensional Array of Rigid Cylinders*, Physics Review Letters, 80, 5352, 1998.
- [19] J. V. Sanchez-Perez, *Acoustic Barriers based on Periodic Arrays of Scatterers*, Applied Physics Letters, 81, 5240, 2002.
- [20] O. Oltulu, A. M. Mamedov, E. Ozbay, *Band gap structure of elliptic rods in water for a 2D phononic crystal*, Applied Physics and Material Science Process, 123, 212, 2017.
- [21] L. Godinho, D. Soares, P. G. Santos, *Efficient analysis of sound propagation in sonic crystals using an ACA-MFS approach*, Eng Anal Bound Elem, 69, 72–85, 2016.
- [22] F. Montiel, H. Chung, M. Karimi, N. Kessissoglou, *An analytical and numerical investigation of acoustic attenuation by a finite sonic crystal*, Wave Motion, 70, 135–151, 2017.

**Część III**

# **ELEKTROAKUSTYKA**



## Rozdział 10

# Wskaźnik transmisji mowy w projektowaniu systemów nagłaśniania – metoda uproszczona dla systemów centralnych

Paweł Dziechciński

*Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów, Politechnika Wrocławska  
Wyb. Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław*

e-mail: [pawel.dziehcinski@pwr.edu.pl](mailto:pawel.dziehcinski@pwr.edu.pl)

Zasady projektowania systemów nagłaśniania mających na celu zapewnienie odpowiedniej zrozumiałości mowy, są przedstawiane w literaturze głównie w oparciu o obliczenia współczynnika utraty wyrazistości spółgłoskowej ( $AL_{cons}$ ). W Europie wymagania w tym zakresie określone są najczęściej za pomocą wskaźnika transmisji mowy ( $STI$ ). W pracy zaproponowano metodę projektowania centralnych systemów nagłaśniania umożliwiającą uzyskanie zakładanych wartości wskaźnika transmisji mowy poprzez zaprojektowanie systemu, który zapewni odpowiednio duży poziom dźwięku sygnału. Wymagany poziom sygnału oraz graniczne wartości czasu pogłosu nagłaśnianego pomieszczenia można odczytać z charakterystyk przedstawionych w pracy.

### 10.1. Wprowadzenie

Zasady projektowania systemów nagłaśniania mających na celu zapewnienie odpowiedniej zrozumiałości mowy, są najczęściej przedstawiane w literaturze w oparciu o współczynnik utraty wyrazistości spółgłoskowej (ang. *Articulation Loss of Consonants –  $AL_{cons}$* ) [2, 7]. Metoda ta zaproponowana przez Peutza w 1971 roku do zastosowań w akustyce architektonicznej [17] została następnie zaadaptowana na potrzeby projektowania systemów nagłaśniania przez Kleina [16] i Davisów [6]. Algorytm wyznaczania  $AL_{cons}$  został udoskonalony przez Peutza w 1988 roku [18]. Kolejną próbę jego modyfikacji w zastosowaniach akustyki architektonicznej podjęli Bistafa i Bradley w roku 2000 [3], a ostatnią znaną autorowi van der Werff, de Leeuw i Metkemeijer [21, 22]. Zasadniczą zaletą tej metody jest prostota obliczeniowa. Wadami są z kolei mała korelacja wyników obliczeń ze zrozumiałością mowy dla systemów nagłaśniania w pomieszczeniach o dużym czasie pogłosu [15], oraz nie uwzględnienie wpływu poziomu sygnału i zniekształceń liniowych na zrozumiałość mowy. Wady te w istotny sposób ograniczają przydatność metody  $AL_{cons}$  do stosowania w projektowaniu systemów nagłaśniania.

Wskaźnik transmisji mowy (ang. *Speech Transmission Index –  $STI$* ) jest metodą opracowaną przez Houtgasta i Steenekena. Jej początki sięgają lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku [10, 11], natomiast do zastosowań w akustyce architektonicznej zaproponowano ją w roku 1980 [12]. Do popularyzacji tej

metody przyczyniła się jej standaryzacja w normie IEC 60268-16 (posiada odpowiednik serii PN) oraz wprowadzenie jej uproszczonej odmiany RASTI [13] (ang. *Rapid STI* lub *Room Acoustic STI*) i wykorzystującego ją systemu pomiarowego. Metoda ta była cały czas rozwijana co miało swoje odzwierciedlenie w kolejnych wydaniach normy IEC 60268-16 – obecnie obowiązuje jej piąta edycja [14]. Rozwój ten dotyczył między innymi zastosowań w systemach nagłaśniania, na potrzeby których wprowadzono uproszczoną odmianę *STI* nazwaną wskaźnikiem transmisji mowy dotyczącym systemów rozgłoszeniowych (ang. *STI for Public Address Systems – STIPA*). W stosunku do pierwszych wersji algorytmu modyfikacje dotyczyły widma sygnału oraz uwzględnienia w algorytmie efektów słuchowych (próg rozumienia, maskowanie). W stosunku do  $AL_{cons}$  model *STI* jest bardziej skomplikowany i to między innymi utrudnia jego wykorzystanie na etapie inżynierskiego projektowania systemów nagłaśniania. W literaturze [7] można wprawdzie znaleźć wzory pozwalające przeliczyć wartości z  $AL_{cons}$  na *STI* i odwrotnie. Wzory te pochodzą z okresu, kiedy w praktyce wykorzystywano głównie metodę RASTI (od wielu lat nie zalecaną do stosowania). Ze względu na ograniczenia metody RASTI korelacja między jej wynikami a wartościami  $AL_{cons}$  była relatywnie duża. W przypadku obecnie stosowanych modeli *STI* norma IEC 60268-16 nie dopuszcza wykorzystywania tych zależności.

Metodę *STI* uznaje się obecnie za najbardziej zaawansowaną obiektywną metodę oceny systemów nagłaśniania. Z tego względu oraz ze względu na jej normalizację wymagania dotyczące zrozumiałości mowy w systemach nagłaśniania, są w Europie najczęściej określone za pomocą wartości *STI*. Dotyczy to dźwiękowych systemów ostrzegawczych (DSO) [5] gdzie wymaga się *STI* nie mniejszych niż 0,50 jak i systemów informacji pasażerskiej [20], gdzie wymaga się *STI* nie mniejszych niż 0,45.

Wymagania dotyczące systemów nagłaśniania określone w skali *STI* i metody projektowania opisane przez  $AL_{cons}$  przy równoczesnym ograniczeniu możliwości przeliczania między tymi parametrami stanowią znaczne utrudnienie dla projektantów. W praktyce potwierdzeniem spełnienia wymagań na etapie projektowania są głównie wyniki symulacji komputerowych wykonane z wykorzystaniem dedykowanych do tego celu programów obliczeniowych. Ułatwieniem przy projektowaniu DSO może być opisana w normie CEN/TS 54-32 [5] normatywna (ang. *prescriptive*) metoda projektowania możliwa do stosowania w prostych akustycznie obiektach. Dla takich obiektów metoda ta wymaga od projektantów jedynie umiejętności zaprojektowania systemu nagłaśniania zapewniającego odpowiednio duży poziom dźwięku. W pracy zaproponowano rozszerzony zbiór wartości czasu pogłosu i poziomu zakłóceń akustycznych, dla których możliwe jest ograniczenie się przez projektanta do zaprojektowania centralnego systemu nagłaśniania o odpowiednio dużym poziomie dźwięku. Wartości te przedstawiono w formie wykresów przygotowanych dla typowych przypadków spotykanych w praktyce.

## 10.2. Metody projektowania według CEN/TS 54-32

Podstawą do wykonania projektu systemu rozgłoszeniowego, który ma zapewnić wymaganą zrozumiałość mowy jest posiadanie danych na temat czasu pogłosu nagłaśnianego obiektu i poziomu zakłóceń akustycznych. Złożoność procedury projektowej jest uzależniona od wartości obu tych parametrów. W CEN/TS 54-32 [5] wprowadzono dwie metody projektowania:

1. normatywna przeznaczona dla prostych akustycznie obiektów,
2. dokładna, którą można wykorzystywać do wszystkich obiektów.

Metoda normatywna może być stosowana, gdy czas pogłosu pomieszczenia (wartość średnia z pasm 1/1 oktawy od 500 Hz do 2 kHz) jest nie większy niż 1,3 s, a poziom zakłóceń  $LA_{eq,n} < 65$  dB. Metoda ta ogólnie rzecz biorąc polega na zaprojektowaniu systemu pod kątem uzyskiwania odpowiednio dużych poziomów dźwięku ( $LA_{eq,s} > 75$  dB) co zapewni  $SNR > 10$  dB i odpowiednio małych nierównomierności jego rozkładu, oraz umieszczeniu głośników relatywnie blisko słuchaczy. W tym celu podaje się następujące zalecenia co do lokalizacji głośników:

1. wysokość montażu nie większa niż 5 m,
2. odległość między środkami sąsiadujących głośników nie większa niż:
  - a) 6 m dla głośników jednokierunkowych,
  - b) 12 m dla głośników dwukierunkowych,
3. odległość między głośnikiem i słuchaczem nie większa niż:
  - a) 4,5 m dla głośników jednokierunkowych,
  - b) 6,0 m dla głośników dwukierunkowych.

Dokładna metoda projektowania polega na obliczeniach  $STI$  za pomocą metody statystycznej lub symulacjach komputerowych opartych o odpowiedź impulsową zgodnie z normą IEC 60268-16 [14]. Algorytm wyznaczania  $STI$  wykorzystuje jako podstawę do obliczeń poziomy sygnał i poziomy zakłóceń akustycznych w pasmach 1/1 oktawy z zakresu od 125 Hz do 8 kHz oraz funkcję przenoszenia modulacji  $m(f_m)$ .

Funkcję przenoszenia modulacji  $m(f_m)$  dla danego pasma 1/1 oktawy można wyznaczyć statystycznie ze wzoru (10.1):

$$m(f_m) = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C} \quad (10.1)$$

gdzie:

$$A = \frac{Q}{d^2} + \frac{1}{r_c^2} \left[ 1 + \left( \frac{2\pi f_m T}{13,8} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$B = \frac{2\pi f_m T}{13,8 r_c^2} \left[ 1 + \left( \frac{2\pi f_m T}{13,8} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$C = \frac{Q}{d^2} + \frac{1}{r_c^2} + Q \cdot 10^{-\frac{SNR_{1m}}{10}}$$

$Q$  – współczynnik kierunkowości urządzenia głośnikowego,  $d$  – odległość źródło – słuchacz,  $f_m$  – częstotliwość modulacyjna,  $T$  – czas pogłosu,  $SNR_{1m}$  – stosunek sygnału do szumu w odległości 1 m ( $SNR_{1m} = L_{eq,s1m} - L_{eq,n}$ ),  $L_{eq,n}$  – równoważny poziom ciśnienia akustycznego zakłóceń,  $L_{eq,s1m}$  – równoważny poziom ciśnienia akustycznego sygnału w odległości 1 m,  $r_c$  – promień graniczny pomieszczenia dla  $Q = 1$  - wzór (10.2) [12]:

$$r_c = 0,057 \sqrt{\frac{QV}{T}} \quad (10.2)$$

Drugim sposobem wyznaczania funkcji przenoszenia modulacji stosowanym w symulacjach komputerowych jest wykorzystanie odpowiedzi impulsowej zgodnie ze wzorem (10.3):

$$m_k(f_m) = \frac{|\int_0^\infty h_k(t) e^{-j2\pi f_m t} dt|}{\int_0^\infty h_k(t)^2 dt} \cdot \left[ 1 + 10^{-SNR_k/10} \right]^{-1} \quad (10.3)$$

gdzie  $h_k(t)$  – odpowiedź impulsowa w  $k$ -tym pasmie 1/1 oktawy,  $SNR_k$  – stosunek sygnału do szumu w  $k$ -tym pasmie 1/1 oktawy.

### 10.3. Koncepcja zaproponowanej metody

Dopuszczalne wartości graniczne czasu pogłosu i poziomu zakłóceń akustycznych dla metody normatywnej z CEN/TS 54-32 można dla centralnych systemów nagłaśniania rozszerzyć do większego

zbioru dopuszczalnych wartości. W tym celu na podstawie modelu *STIPA* należy wygenerować odpowiednie charakterystyki, dla przypadku, gdy słuchacz znajduje się w relatywnie dużych odległościach od głośnika. W takim przypadku wpływ czasu pogłosu na wartość  $m(f_m)$  można wyznaczyć ze wzoru (10.4) [12, 14]:

$$m(f_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_m T}{13,8}\right)^2}} \quad (10.4)$$

a wpływ *SNR* ze wzoru (10.5):

$$m(f_m) = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{SNR}{10}}} \quad (10.5)$$

Łączny wpływ czasu pogłosu i *SNR* na  $m(f_m)$  jest iloczynem obu tych składników. Wartości *STI* wyznacza się na podstawie funkcji przenoszenia modulacji  $m(f_m)$  oraz poziomów sygnału i zakłóceń akustycznych w pasmach 1/1 oktawy z zakresu od 125 Hz do 8 kHz zgodnie z algorytmem z normy IEC 60268-16:2020. Takie analizy powinny zapewniać pewne niedoszacowanie wartości *STI* ze względu na współczynniki kierunkowości typowych urządzeń głośnikowych.

## 10.4. Wpływ poziomu dźwięku i stosunku sygnału do zakłóceń na *STIPA*

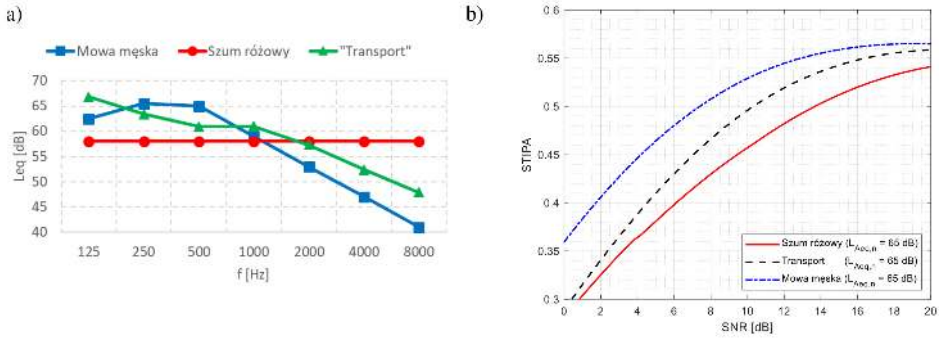
Projektant systemów nagłaśniania musi znać wpływ poszczególnych czynników na zrozumiałość mowy. Omówienie wpływu każdego z nich leży poza zakresem niniejszej publikacji. Przedstawione zostaną jednak najważniejsze z tych czynników czyli czas pogłosu, poziom sygnału i stosunek sygnału do zakłóceń. Wpływ czasu pogłosu jest jednym z istotniejszych zagadnień tej publikacji i szczegółowo zostanie opisany w następnym punkcie. W tym punkcie omówiony zostanie głównie wpływ poziomu sygnału i stosunku sygnału do zakłóceń. Wcześniej należy jednak dokonać wyboru widm zakłóceń, oraz ocenić jak poszczególne widma wpływają na *STIPA*. Analizy wykonano dla trzech widm sygnału, które autor wykorzystuje najczęściej w praktyce projektowej, jeśli nie są znane widma rzeczywistych zakłóceń. Są to mowa męska według IEC 60268-16:2020, tzw. widmo „transport” określone między innymi w normie PN-EN 1793-3 [19] oraz widmo szumu różowego (rys. 10.1a). Wpływu szumu białego stosowanego często w analizach związanych z telekomunikacją [4] nie oceniano, ze względu na to, że w przypadku systemów nagłaśniania i zakłóceń o relatywnie dużych poziomach takie widmo raczej nie występuje.

Mowa męska jest dobrym przybliżeniem zakłóceń wynikających z rozmów. Widmo zakłóceń jest w tym przypadku takie samo jak widmo sygnału i z analizowanych przypadków w najmniejszym stopniu degradująco wpływa na wartości *STI* (rys. 10.1b). Widmo „transport” stosowane jest kiedy źródłem zakłóceń jest komunikacyjny hałas drogowy. Można je też stosować jako widmo hałasu generowanego przez pojazdy kolejowe na postoju [1]. Szum różowy ma najmniej korzystne widmo z analizowanych przypadków (rys. 10.1b). Wynika to z relatywnie dużych poziomów w zakresie dużych częstotliwości widma, których wpływ na *STI* jest największy.

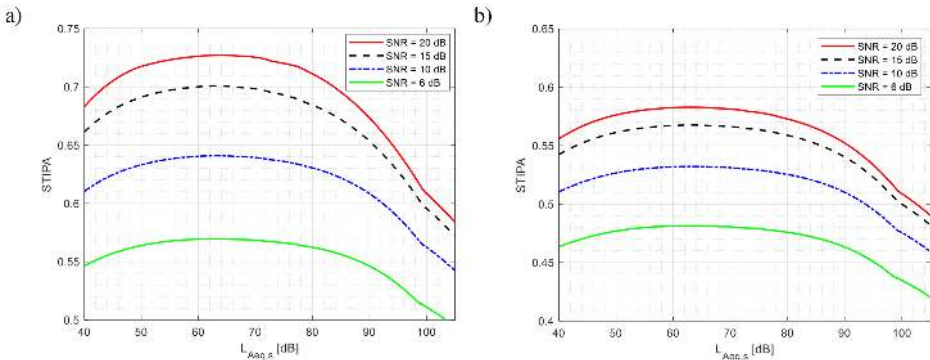
Wpływ poziomu dźwięku na *STIPA* dla różnych wartości *SNR* w przypadku zakłóceń o widmie mowy męskiej i dla dwóch przykładowych wartości czasu pogłosu przedstawiono na rys. 10.2. Optymalnymi dla zrozumiałości mowy poziomami dźwięku jest zakres od 60 do 70 dB, a więc wartości typowe dla komunikacji bezpośredniej. W przypadku systemów nagłaśniania bardzo często konieczne jest uzyskiwanie większych poziomów dźwięku. W takim przypadku należy pamiętać, że *STI* maleje wraz ze wzrostem poziomu dla poziomów dźwięku większych od 80 dB. Dla określonego poziomu zakłóceń zbyt duże poziomy sygnału, a tym samym zbyt duże wartości *SNR* mogą negatywnie wpływać



na *STI*. Taką sytuację przedstawiono na rys. 10.3b, gdzie w przypadku zakłóceń o poziomach 60-70 dB zbyt duże wartości *SNR* mogą w stosunku do wartości optymalnej zmniejszyć *STI* o jedną kategorię (0,04). Dla mniejszych poziomów dźwięku sygnału maksymalne wartości *STI* można uzyskać dla *SNR* z przedziału 15-20 dB co przedstawiono na rys. 10.3a.



**Rys. 10.1.** a) wybrane widma zakłóceń o poziomie dźwięku  $L_{Aeq,n} = 65$  dB i b) ich wpływ na *STIPA* dla czasu pogłosu  $T = 1,0$  s

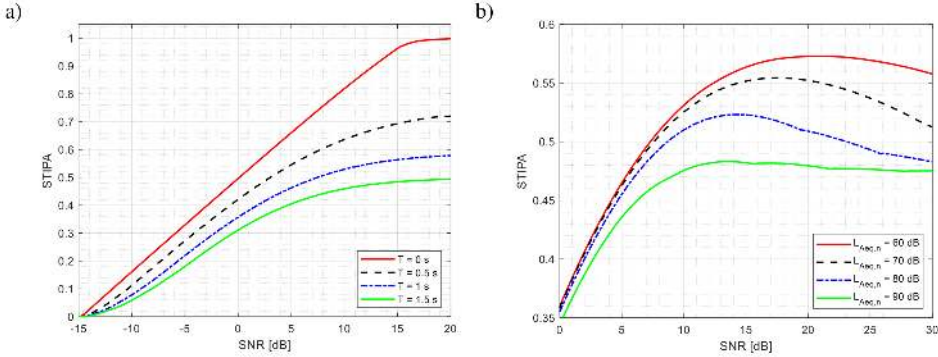


**Rys. 10.2.** Wpływ poziomu dźwięku na *STIPA* dla różnych wartości *SNR* – zakłócenia o widmie mowy męskiej, czas pogłosu: a) 0,5 s, b) 1,0 s

## 10.5. Graniczne warunki akustyczne

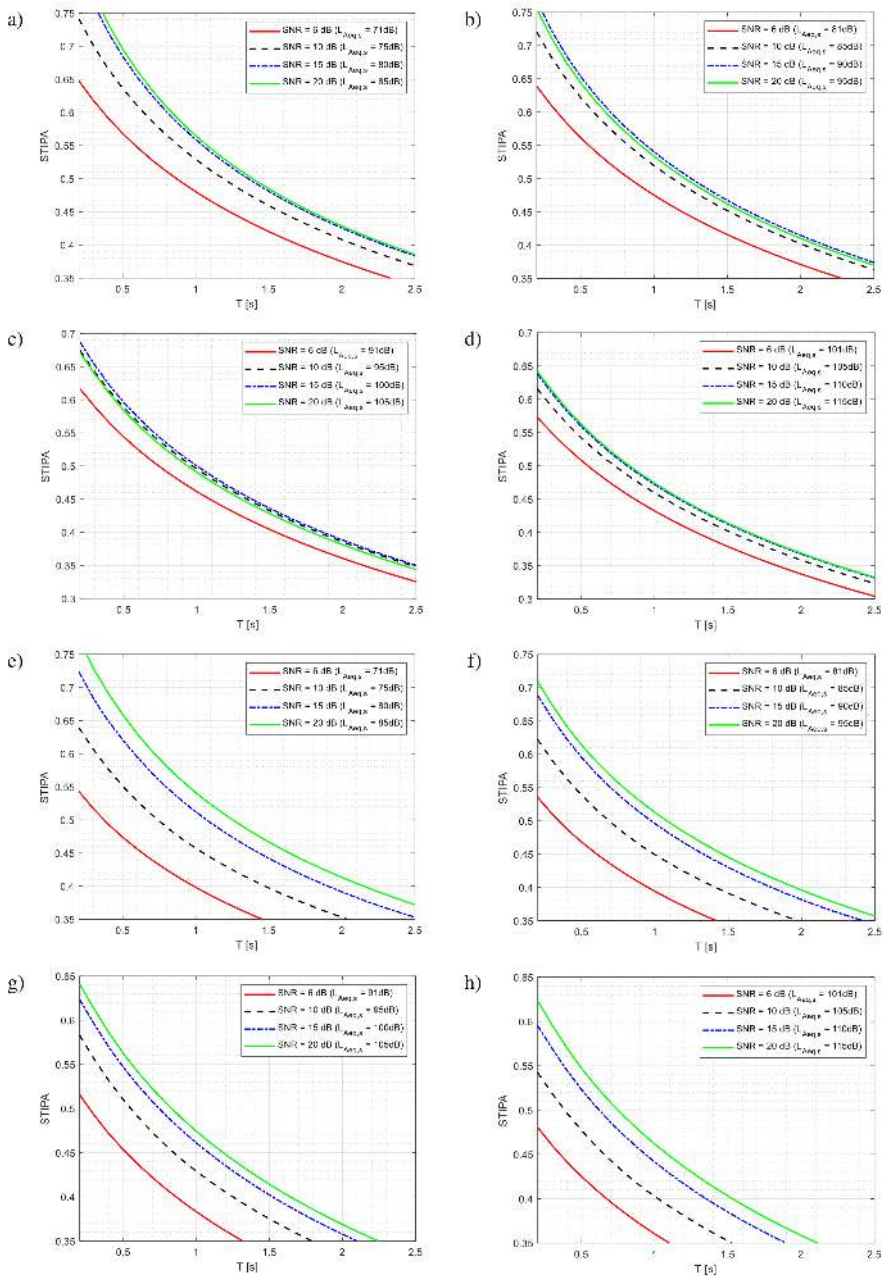
Dopuszczalne wartości graniczne czasu pogłosu i *SNR*, który należy zapewnić na etapie projektowania centralnego systemu nagłośnienia w celu uzyskania określonej wartości *STI* można odczytać z charakterystyk przedstawionych na rys. 10.4. Charakterystyki te uzyskano na podstawie zależności przedstawionych w punkcie 3. i korzystając z algorytmu wyznaczania *STIPA* z normy IEC 60268-16:2020. Do analiz wybrano dwa widma zakłóceń: widmo mowy męskiej według IEC 60268-16:2020 i szum różowy. Takie widma stanowią dwa skrajne typowe przypadki z jakimi można spotkać się przy projektowaniu systemów nagłośnienia. W stosunku do metody normatywnej z CEN/TS 54-32 należy więc

poza poziomem zakłóceń dokonać wyboru ich widma. Poziomy zakłóceń  $L_{Aeq,n}$  ustalono na 65, 75, 85 i 95 dB, co również obejmuje typowy zakres poziomów zakłóceń stosowanych w praktyce. Do analiz przyjęto wyrównaną charakterystykę czasu pogłosu w funkcji częstotliwości.



**Rys. 10.3.** Wpływ SNR na  $STIPA$  dla zakłóceń o widmie męskiej: a) dla poziomu dźwięku sygnału  $L_{Aeq,s} = 75$  dB i dla różnych wartości czasu pogłosu  $T$ , b) dla różnych wartości poziomu zakłóceń

Wartość graniczna czasu pogłosu dla metody normatywnej z CEN/TS 54-32 wynosząca 1,3 s jest zbliżona do wartości 1,2 s, którą można odczytać z rys. 10.4a dla  $SNR$  wynoszącego 10 dB i  $STIPA = 0,50$ . Z rys. 10.4e wynika z kolei, że w przypadku postępowania zgodnie z metodą normatywną z CEN/TS 54-32 dla tak trudnego widma zakłóceń jak szum różowy, rezultaty mogą być niezadowalające. Np. w pomieszczeniu o czasie pogłosu 1,2 s uzyskanie  $STIPA \geq 0,50$  wymaga zapewnienia  $SNR \geq 20$  dB, a nie jak w metodzie normatywnej  $SNR > 10$  dB. Na podstawie charakterystyk przedstawionych na rys. 10.4 można ocenić, czy w przypadku projektowanego systemu należy brać pod uwagę wpływ właściwości kierunkowych urządzeń głośnikowych na  $STIPA$ . Jeżeli dla czasu pogłosu nagłaśnianego pomieszczenia oraz występującego w nim poziomu i widma zakłóceń da się według tych charakterystyk uzyskać wymaganą wartość  $STIPA$ , to znaczy, że projektowanie nagłaśnienia wystarczy ograniczyć do zapewnienia odpowiedniego poziomu dźwięku i jego nierównomierności rozkładu. Wymagany poziom dźwięku sygnału również można określić na podstawie charakterystyk, poprzez zwiększenie poziomu zakłóceń o wyznaczoną z charakterystyk wartość  $SNR$ . W praktyce warunki, dla których można uprościć projektowanie mogą dotyczyć większych poziomów zakłóceń niż określone dla metody uproszczonej z CEN/TS 54-32, ale równocześnie dla mniejszych wartości czasu pogłosu. Nie zawsze należy też ograniczać się do  $SNR > 10$  dB. Np. dla pomieszczenia o czasie pogłosu 1 s oraz zakłóceniach o poziomie  $L_{Aeq,n} = 75$  dB (rys. 10.4f) i widmie szumu różowego, można projektować system metodą uproszczoną, dla zakładanych wartości  $STIPA = 0,50$ , ale pod warunkiem, że  $SNR > 15$  dB, a więc system musi zapewnić poziom sygnału  $L_{Aeq,s} > 90$  dB. Jak wiadomo metoda statystyczna ma szereg ograniczeń, które mogą sprawić, że uzyskane w praktyce wartości  $STIPA$  mogą być mniejsze. Z drugiej strony pewnym marginesem bezpieczeństwa dla tych analiz, jest to, że współczynniki kierunkowości rzeczywistych urządzeń głośnikowych dla pasma oktawowego 2 kHz (mającego największy wpływ na  $STI$ ) są znacznie większe niż 1 (w praktyce zazwyczaj większe niż 5), a więc w pobliżu głośnika wartości  $STIPA$  powinny być większe od odczytanych z wykresów na rys. 10.4. Ostatecznie więc średnie wartości  $STIPA$  dla nagłaśnianego obszaru powinny spełniać wymagania z nadmiarem. Warunkiem jest zaprojektowanie centralnego systemu nagłaśniania, tak aby nierównomierności rozkładu poziomu dźwięku nie były zbyt duże.



**Rys. 10.4.** Wpływ czasu pogłosu na *STIPA* dla dużych odległości od źródła – zakłócenia:  
 – o widmie mowy męskiej i poziomie  $L_{Aeq,n}$  równym: a) 65 dB, b) 75 dB, c) 85 dB i d) 95 dB,  
 – o widmie szumu różowego i poziomie  $L_{Aeq,n}$  równym: e) 65 dB, f) 75 dB, g) 85 dB i h) 95 dB

## 10.6. Podsumowanie

W pracy zaproponowano metodę projektowania centralnych systemów nagłaśniania umożliwiającą uzyskanie zakładanych wartości wskaźnika transmisji mowy poprzez zaprojektowanie systemu, który zapewni odpowiednio duży poziom dźwięku sygnału. Wymagany poziom sygnału oraz graniczne wartości czasu pogłosu nagłaśnianego pomieszczenia można odczytać z charakterystyk przedstawionych w pracy. Pomimo ograniczeń metody statystycznej, dzięki właściwościom kierunkowym typowych urządzeń głośnikowych średnie wartości *STIPA* dla nagłaśnianego obszaru powinny spełniać wymagania z nadmiarem. Warunkiem jest poprawne zaprojektowanie centralnego systemu nagłaśniania. Oznacza to, że system musi zapewnić w praktyce odpowiednio duże poziomy dźwięku o odpowiednio małych nierównomiernościach rozkładu w przestrzeni.

W przypadku nagłaśniania pomieszczeń o czasach pogłosu większych niż graniczne, uzyskanie wymaganych wartości *STI* może być możliwe, jednak wymaga zastosowania urządzeń głośnikowych o odpowiedniej kierunkowości. Przedstawione w pracy analizy można rozszerzyć o analogiczne charakterystyki, pokazujące wpływ właściwości kierunkowych typowych urządzeń głośnikowych na „zasięgi” tych urządzeń w przykładowych pomieszczeniach. Analizy zaprezentowane w pracy dotyczą centralnych systemów nagłaśniania. W przypadku systemów decentralnych, dodatkowe głośniki zwiększają energię dźwięku rozproszonego, a tym samym zmniejszają promień graniczny. W przypadku systemów promieniujących poziomo, urządzenia głośnikowe oddalone o więcej niż 17 m mogą też dawać efekt zbliżony do efektu echa. W związku z tym, w przypadku systemów decentralnych należy spodziewać się mniejszych wartości *STIPA*. W systemach tych najczęściej możliwe jest jednak zmniejszenie odległości między głośnikiem a słuchaczem, co z kolei ma pozytywny wpływ na *STI* zwłaszcza w przypadku wykorzystywania głośników o odpowiedniej kierunkowości. Wykonanie analiz uwzględniających wpływ właściwości kierunkowych typowych urządzeń głośnikowych na „zasięgi” tych urządzeń w pomieszczeniach oraz zasady projektowania dla systemów decentralnych planowane jest w przyszłości.

## Bibliografia

- [1] W. Ahnert, F. Steffen, *Sound Reinforcement Engineering*, E&FN Spon, 1999.
- [2] G. M. Ballou (ed.), *Handbook for Sound Engineers*, 5th edition, Focal Press, 2015.
- [3] S. R. Bistafa, J. S. Bradley, *Revisiting algorithms for predicting the articulation loss of consonants ALcons*, J. Audio Eng. Soc., 48 (6), 532, 2000.
- [4] S. Brachmański, *Wybrane zagadnienia oceny jakości transmisji sygnału mowy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015.
- [5] CEN/TS 54-32:2015, Fire detection and fire alarm systems. Planning, design, installation, commissioning, use and maintenance of voice alarm systems.
- [6] D. Davis, C. Davis, *Application of Speech Intelligibility to Sound Reinforcement*, J. Audio Eng. Soc., 37 (12), 1002, 1989.
- [7] D. Davis, E. Patronis, P. Brown, *Sound System Engineering*, 4th edition, Focal Press, 2013.
- [8] P. Dziechciński, *A computer model for calculating the speech transmission index using the direct STIPA method*, Vibrations in Physical Systems, 30 (1), art. 2019129, 1–8.
- [9] P. Dziechciński, M. Hadyk, *Projektowanie systemów rozgłoszeniowych na otwartych peronach kolejowych*, Postępy akustyki 2017, red. Bismor D., Gliwice, Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział Górnośląski, 197–208, 2017.
- [10] T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, *Evaluation of Speech Transmission Channels by Using Artificial Signals*, Acustica, 25, 355–367, 1971.
- [11] T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, *The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility*, Acustica, 28, 66–73, 1973.

- 
- [12] T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, R. Plomp, *Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics*, *Acustica*, 46 (1), 60–72, 1980.
- [13] T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, *A Multi-Language Evaluation of the RASTI-Method for Estimating Speech Intelligibility in Auditoria*, *Acustica*, 54, 185–199.
- [14] IEC 60268-16:2020. Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- [15] K. D. Jacob, *Subjective and Predictive Measures of Speech Intelligibility – The Role of Loudspeaker Directivity*, *J. Audio Eng. Soc.*, 33 (12), 1985.
- [16] W. Klein, *Articulation Loss of Consonants as a Basis for the Design and Judgment of Sound Reinforcement Systems*, *J. Audio Eng. Soc.*, 19 (11), 920, 1971.
- [17] V. M. A. Peutz, *Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room*, *J. Audio Eng. Soc.*, 19 (11), 915, 1971.
- [18] V. M. A. Peutz, *Speech Information and Speech Intelligibility*, presented at the 85th Convention of the Audio Engineering Society, paper 2732, November, 1988.
- [19] PN-EN 1793-3:2001. Drogowe urządzenia przeciwhałasowe – Metoda badania w celu wyznaczenia właściwości akustycznych – Część 3: Znormalizowane widmo hałasu drogowego.
- [20] Rozporządzenie komisji (UE) nr 1300/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności odnoszących się do dostępności systemu kolei Unii dla osób niepełnosprawnych i osób o ograniczonej możliwości poruszania się (Dz.U. L 356 z 12.12.2014, s. 110).
- [21] J. Van der Werff, D. de Leeuw, *What You Specify Is What You Get (part 1)*, presented at the 114th Convention of the Audio Engineering Society, paper 5762, March 2003.
- [22] J. Van der Werff, R.A. Metkemijer, *What You Specify Is What You Get (part 2)*, presented at the 114th Convention of the Audio Engineering Society, paper 5763, March 2003.



**Część IV**

**METROLOGIA  
I PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW**





## Rozdział 11

# DOP and Pseudorange Error Estimation in Mobile GNSS Systems for Android OS Applications

Przemysław Falkowski-Gilski, Zbigniew Łubniewski

*Gdansk University of Technology, Faculty of Electronics, Telecommunications and Informatics,  
Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk*

e-mail: [przemyslaw.falkowski@eti.pg.edu.pl](mailto:przemyslaw.falkowski@eti.pg.edu.pl), [lubniew@eti.pg.edu.pl](mailto:lubniew@eti.pg.edu.pl)

In the near past, GNSS (Global Navigation Satellite Systems) were only offered for a narrow group of recipients. Nowadays, thanks to mobile devices, they are available to anyone and everywhere. Personal navigation, searching for POI (Point of Interest), etc., had become a basic essential activity. Thanks to the widespread and availability of smartphones each user can obtain information considering his or her location even in an unknown environment. Furthermore, network operators and providers use this location-based information for monitoring and maintenance purposes. This paper is focused on a study, considering the DOP (Dilution of Precision) and pseudorange error estimation in case of Android-powered mobile devices operating outdoors. It describes a measurement campaign, carried out in varying urban environments while driving a car, including two popular consumer devices from different manufacturers running Android OS. Based on this, respective conclusions and remarks are given. This work aims to aid not only users, but also application developers as well as device manufacturers and retailers, when it comes to providing precise and reliable products and services.

### 11.1. Introduction

Nowadays, there is a wide group of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) operating around the world. They utilize artificial satellites, constantly generating signals and transmitting them to the surface of the Earth. Mobile devices, particularly smartphones with a complex set of wireless modules, enable to take advantage of a number of available national and international systems, including: GPS (USA), GLONASS (Russia), Galileo (Europe/EU), BeiDou (China), NAVIC (India), and QZSS (Japan) [11, 15]. A brief description of those GNSS, as well as utilized frequency band, is described in Tab. 11.1.

It seems that the variety of GNSS-based applications is unlimited. Currently, they are utilized in e.g. forwarding and logistics, aerial, road and sea transport, personal motorized and pedestrian navigation, searching for POI (Point of Interest), etc. It is worth mentioning that currently every mobile device has an integrated circuit, responsible for processing GNSS signals [2]. Due to the popularity and widespread

of portable devices, it seemed interesting to investigate the precision that modern smartphones can offer. Particularly, what is the accuracy of satellite positioning and navigation systems for urban mobility applications. That is why this study, concerning Android-powered terminals, was carried out.

**Table 11.1**  
Modern global navigation satellite systems

| <i>No.</i> | <i>System</i> | <i>Origin</i>        | <i>Frequency band</i>  |
|------------|---------------|----------------------|--|
| 1          | GPS           | USA                  | 1.563–1.587 GHz (L1), 1.215–1.2396 GHz (L2),<br>1.164–1.189 GHz (L5), 1.593–1.610 GHz (G1) |
| 2          | GLONASS       | Russia               | 1.237–1.254 GHz (G2), 1.189–1.214 GHz (G3),<br>1.559–1.592 GHz (E1)                        |
| 3          | Galileo       | Pan-European<br>(EU) | 1.164–1.215 GHz (E5a/b), 1.260–1.300 GHz (E6),<br>1.561098 GHz (B1)                        |
| 4          | BeiDou        | China                | 1.589742 GHz (B1-2), 1.20714 GHz (B2),<br>1.26852 GHz (B3), 1.17645 GHz (L5)               |
| 5          | Navic         | India                | 2.492028 GHz (S), 1.57542 GHz (L1-C/A),<br>1.57542 GHz (L1C), 1.2276 GHz (L2C)             |
| 6          | QZSS          | Japan                | 1.17645 GHz (L5), 1.57542 GHz (L1-SAIF),<br>1.27875 GHz (LEX)                              |

## 11.2. Android Consumer Devices

Due to the technological development, mobile terminals have evolved into functionally-sophisticated devices, such as smartphones. The Android platform has become one of the most popular operating system, with millions of new users each year. As handheld devices become more popular, the role of an operating system grows significantly. Current Android-powered devices are full of integrated hardware, including IMUs (Inertial Measurement Units) such as cameras, gyroscopes, accelerometers, as well as various wireless interfaces, including a build-in cellular and GNSS receiver. This OS enables third-party applications to make use of these hardware features and provides a suitable user environment.

Android itself, as an open environment, is a member of the Linux family. The difference between the Android and Linux kernel, runtime environment, security and privacy risks, etc., is discussed in [8]. Whereas, the matter of mobile security is further analyzed in [16]. As shown, the Android operating system, and related consumer devices, are utilized for a number of purposes, even in testing and monitoring electrical components of machines. The matter of such an IoT (Internet of Things) system, as an element of the Industry 4.0 concept, is described in [12].

### 11.2.1. Positioning Accuracy

The positioning accuracy of a GNSS system may be evaluated in a number of ways. The most popular one is based on CNR (Carried-to-NoiseRatio), usually expressed in dBHz [3]. Another approach is related to the number of observed and monitored satellites, including the DOP (Dilution of Precision)

coefficient, related to the geometry of the constellation, and its impact on precision [9]. The DOP can be defined in a number of variants:

- GDOP (Geometric DOP) – related to the positioning accuracy in 4 dimensions (3D space and time).
- HDOP (Horizontal DOP) – related to the positioning accuracy in the horizontal plane.
- VDOP (Vertical DOP) – related to the positioning accuracy in the vertical plane (height).
- TDOP (Time DOP) – related to the accuracy of time measurements.
- PDOP (Position DOP) – related to positioning accuracy in 3 spatial dimensions.

Generally speaking, the lower the value, the higher the reliability (confidence) of positioning calculations. However, when DOP is close to or equal to zero, obtaining a position is not possible, due to too low signal level or severe interference. Whereas, when it reaches a threshold of 20 and above, the signal quality does not provide reliable measures as well.

### 11.2.2. Navigation in Android OS

Before 2016, Android-powered devices, up to Android Marshmallow 6.0, had limited access to navigation and/or positioning data. At that time, the API (Application Programming Interface) enabled to access basic information concerning the satellite's azimuth, elevation, SNR (Signal-to-Noise Ratio), PVT (Position, Velocity and Time), status of the chipset (active or inactive), latitude and longitude data, estimated positioning accuracy (in meters), as well as NMEA (National Marine Electronics Association) data. This enabled a positioning accuracy of a couple of meters (most often 2-3 m).

Since 2017, the newly introduced version of Android, called Nougat (7.0), enabled to utilize raw positioning data [6]. From then developers were able to use a set of dedicated additional classes and related methods in order to design more precise software, including information about the GNSS clock (for pseudorange error calculation purposes), how to decode incoming bits from available satellite constellations, as well as the time, code and phase of a particular carrier from a given satellite, not to mention the Doppler shift.

Further improvements included integrating the PPP (Precise Point Positioning) technique [10], as well as sensor fusion, together with the mobile device's build-in light and pressure sensor, IMU (Inertial Measurement Unit), accelerometer, gyroscope, magnetometer, etc. Recent studies related to the subject of mobile positioning are available in [6, 9, 10, 13].

## 11.3. The study

### 11.3.1. Mobile Devices

The study was carried out using two mobile devices, particularly smartphones. They came from different manufacturers, and are further labeled as Smartphone 1 and Smartphone 2.

The first one had a 8-core CPU (2.2 GHz), 3 GB of RAM, a 3000 mAh battery, and was powered by Android Pie (9.0). According to the technical note, the integrated GNSS module was compatible with GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS.

The second device had also a 8-core CPU (2.3 GHz), 4 GB of RAM, 4000 mAh battery, and was powered by Android Pie (9.0) as well. The integrated GNSS module was compatible with GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou.

All obtained data were recorded in the raw format, and then processed using the GNSS Measurement Tool as well as Matlab software. During both measurement and processing, we utilized our custom software, in order to obtain as much data as possible. The measurement campaign included 2

types of routes (square-shaped and straight line), 1 type of communication means (car), and of course 2 smartphones.

### 11.3.2. Evaluated Routes

In the first scenario, the route resembled a square, as shown in Fig. 11.1. Whereas in the second one, the route resembled a straight line, as shown in Fig. 11.2. Both routes were evaluated with a car at an average speed of 35 km/h. This route went along 3 streets (Twarda, Chwaszczyńska, and Okrąg) in the city of Gdańsk.



**Fig. 11.1.** Layout of the square-shaped route



**Fig. 11.2.** Layout of the straight line route

It varied in type of structure and its closest neighborhood. Some part of it was surrounded by buildings, and some of it was next to an open terrain. To start with, obtained results will be described

taking into consideration the type of route (square-shaped and straight line), and utilized smartphone (Smartphone 1 and Smartphone 2). Next, obtained results will be compared and discussed.

### Square-shaped route with Smartphone 1

The HDOP value for GPS was equal to approx. 1, and reached 2 when the number of satellites shrank. In case of GLONASS, this parameter oscillated from 1 to even 5. During approx. half of the time, the clock was not concise, resulting in a discontinuous time of satellite observation, especially in case of BeiDou and Galileo. Not surprising, the strongest signal was observed when driving in open terrain. During the measurement campaign, the clock was not stable. Moreover, a frequency drift was observed, equal to 0.18 ppb/s, with a stable clock bias. The pseudorange error for GPS and GLONASS oscillated from -50 to 50 m (see Fig. 11.3). When driving in open space, additional Galileo and BeiDou signals were observed. The highest pseudorange error was observed when the car was in the so-called urban canyon. The WLS estimation was quite precise, especially in the second part of the drive test. At first, even deviations of few meters were observed. During the first 52 s the vertical position was calculated with a huge error (exceeding 5 m). Whereas, for the next 40 s, the accuracy was noticeably higher. However, at the end it reached 50 m. When utilizing WLS on raw data, we obtained more accurate results. The average vertical position was approx. at 0 m, whereas 50% of obtained samples resulted in 6.3 m and less.



Fig. 11.3. Pseudorange error – square-shaped route with Smartphone 1

### Square-shaped route with Smartphone 2

In case of GPS the HDOP value oscillated around approx. 0.9-1.5, whereas in case of GLONASS it did not exceed 1.6. The clock was continuous, with a drift of -0.06 ppb/s. The clock shift was getting higher in a linear scale. The pseudorange error, for most cases (95%) did not exceed 28.7 m. When the car drove among buildings, this error reached to approx. 100 m (see Fig. 11.4). The highest Doppler shifts were equal to 30–50 s and 90–100 s along the Chwaszczyńska and Okrąg streets, where the observed multipath effect was the strongest. Results obtained using WLS were quite good. The biggest error was observed on Okrąg street. The horizontal error was less than 9.7 m for 50% of obtained samples, and less than 20.8 m for 95% of samples. The vertical error was less than 23.4 m for 50% of samples, and less than 44.6 m for 95% of samples.

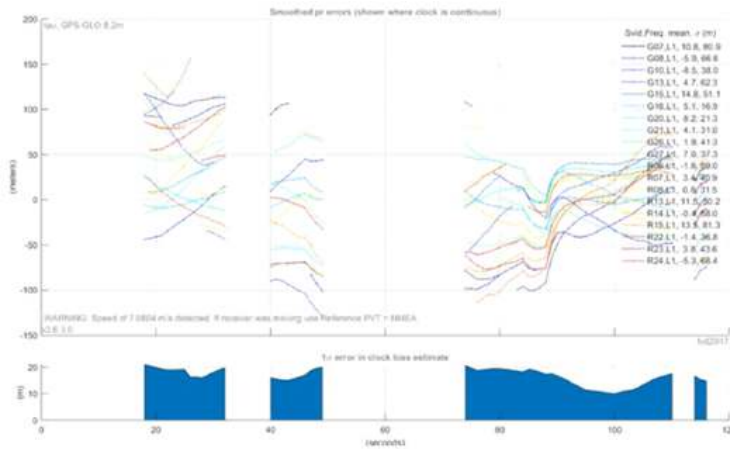


Fig. 11.4. Pseudorange error – square-shaped route with Smartphone 2

### Straight line route with Smartphone 1

The HDOP value ranges from 1.2 to 3. During the evaluation, the clock was not stable, the maximum frequency drift was equal to 11.94 ppb. The clock drift was equal to 512 ppm. Due to clock biases, the pseudorange error in case of 95% of samples was less than 20.7 m. For Galileo, the error raised up to 100 m (see Fig. 11.5). Thanks to WLS, the horizontal error for 95% of samples was less than 7.7 m, whereas for 50% it was less than 0.3 m.

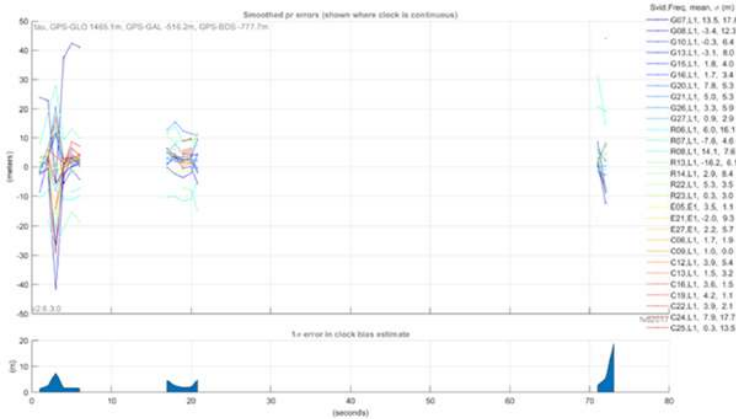


Fig. 11.5. Pseudorange error – straight line route with Smartphone 1

### Straight line route with Smartphone 2

HDOP during 63 s achieved a value of less than 1. During the whole time, the clock was stable, for the first 27 s the drift was relatively stable, increasing by 0.04 ppb/s. The clock bias was increasing linearly, reaching 4.5 ms at the end. The pseudorange error for 95% of samples was less than 13.5 m

(see Fig. 11.6). This is mostly due to the fact that measurements were carried out in an open space. The Doppler shift error oscillated from 0 up to 3 m/s. In case of WLS, the horizontal error for 95% of samples did not exceed 6.8 m, and was less than 3.3 m for 50% of samples. Whereas the vertical error, in case of 50% of samples, was less than 4.5 m. For 95% of data it was less than 13.5 m. According to obtained results, for the first 40 s, the receiver (mobile device) was traveling on flat terrain, then the height decreased. However, this was not correct, as the height itself did not change.

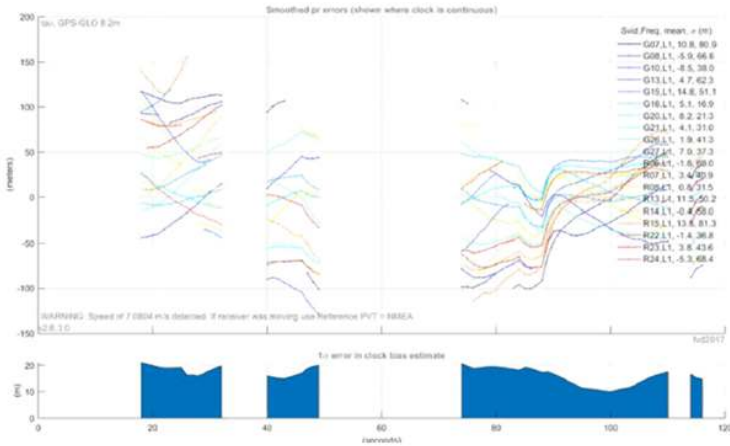


Fig. 11.6. Pseudorange error – straight line route with Smartphone 2

## 11.4. Summary

This work describes results of a study, focused on the DOP and pseudorange precision of GNSS systems using smartphones, their quality, reliability, related to signal reception. The tested devices, coming from 2 different manufacturers, were all Android-powered devices. The measurement campaign itself was carried out in different conditions, including surrounding buildings, terrain topology, and urban fabric. The devices came from a medium-end segment, most popular among consumers. Although indexed at the same level, considering their quality and price, they proved to be different. As a result, obtained results were completely unlike, although tested in the same research scenario.

According to the study, it should be pointed out that numerous factors and conditions influence the final accuracy and precision of satellite positioning, especially in urbanized areas, when using different means of transport. The navigation performance depends on basic characteristics of the smartphone, both communication (e.g. antenna features, supported wireless systems, etc.) and data processing (CPU, RAM, storage, etc.). In such a context, it seems interesting to evaluate and compare in practice a broader range of mobile devices in future studies. As noticed, more and more powerful consumer electronics are released on the market every year. On the other hand, user preferences and expectations do change from time to time. Additional information on mobile devices, including consumption of content and quality-related issues, is available in [4, 5]. Moreover, future studies should include user equipment with diverse integrated GNSS modules, different distributions of the Android operating system, as well as deployment scenarios, particularly terrain type.

## Bibliography

- [1] X. An, X. Meng, W. Jiang, *Multi-constellation GNSS precise point positioning with multifrequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination*, *Satellite Navigation*, 1, 7, 2020.
- [2] Ł. Chruszczyk, *Statistical analysis of indoor RSSI read-outs for 433 MHz, 868 MHz, 2.4 GHz and 5 GHz ISM bands*, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 63 (1), 33–38, 2017.
- [3] Cisco, *Digital transmission, carrier-to-noise ratio, signal-to-noise ratio, and modulation error ratio*, 2012.
- [4] P. Falkowski-Gilski, *On the consumption of multimedia content using mobile devices: A year to year user case study*, *Archives of Acoustics*, 45 (2), 321–328, 2020.
- [5] B. Finley, E. Boz, K. Kilkki, J. Manner, A. Oulasvirta, H. Hämmäinen, *Does network quality matter? A field study of mobile user satisfaction*, *Pervasive and Mobile Computing*, 39, 80–99, 2017.
- [6] GSA, *Using GNSS raw measurements on Android devices*, 2017.
- [7] L. Guo, F. Wang, J. Sang, X. Lin, X. Gong, W. Zhang, *Characteristics analysis of raw multi-GNSS measurement from Xiaomi Mi 8 and positioning performance improvement with L5/E5 frequency in an urban environment*, *Remote Sensing*, 12, 744, 2020.
- [8] J. Khan, S. Shahzad, *Android architecture and related security risks*, *Asian Journal of Technology and Management Research*, 5 (2), 14–18, 2015.
- [9] R. B. Langley, *Dilution of precision*, *GPS World*, 5, 52–59, 1999.
- [10] D. Laurichesse, C. Rouch, F. X. Marmet, M. Pascaud, *Smartphone applications for precise point positioning*, *ION GNSS+ Conference*, Portland, 2017.
- [11] Y. Quan, L. Lau, G. W. Roberts, X. Meng, *Measurement signal quality assessment on all available and new signals of multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BDS, and QZSS) with real data*, *Journal of Navigation*, 69, 313–334, 2016.
- [12] T. Sharmilah, M. Yahya, K. M. Fuzi, M. Pauzi, Z. Shirlynda, N. A. Faris, *Development of temperature monitoring towards Industry 4.0*, *25th International Conference on Applied Physics of Condensed Matter*, Collage Park, 2019.
- [13] C. Specht, T. Szot, P. Dąbrowski, M. Specht, *Testing GNSS receiver accuracy in Samsung Galaxy series mobile phones at a sports stadium*, *Measurement Science and Technology*, 31 (6), 064006, 2020.
- [14] K. Su, S. Jin, G. Jiao, *Assessment of multi-frequency global navigation satellite system precise point positioning models using GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo and QZSS*, *Measurement Science and Technology*, 31 (6), 064008, 2020.
- [15] P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck (eds.), *Springer handbook of global navigation satellite systems*, Springer, Berlin, 2017.
- [16] Z. Ul Abideen, H. Ali Tariq, S. H. Shah Talha Naqash, U. Qaseem, *Android apps management system to ensure mobile security*, *1st IEEE International Conference on Knowledge Innovation and Invention*, Jeju, 2018.



**Część V**

**PSYCHOAKUSTYKA I AKUSTYKA SŁUCHU**



## Rozdział 12

# Różnica w subiektywnej ocenie jakości mowy pomiędzy nastolatkami dwujęzycznymi a jednojęzycznymi

Przemysław Falkowski-Gilski<sup>1</sup>, Stefan Brachmański<sup>2</sup>, Maurycy Kin<sup>2</sup>,  
Andrzej Dobrucki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki;

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki

e-mail: [przemyslaw.falkowski@eti.pg.edu.pl](mailto:przemyslaw.falkowski@eti.pg.edu.pl)

Proces percepcji mowy omawiany jest w szerokim zakresie dziedzin i dyscyplin naukowych, od nauk humanistycznych, technicznych, aż po nauki medyczne. Wiele badań skupia się np. na ocenie różnicy w grupach bez i z wykształceniem muzycznym. Skoro stwierdzono, że zdolności muzyczne wpływają na percepcję poszczególnych atrybutów dźwięku, autorzy postanowili zbadać, czy zdolności językowe także mogą mieć wpływ na ocenę jakości sygnału mowy. W pracy przedstawiono różnicę w postrzeganiu sygnałów mowy pomiędzy młodzieżą szkolną z klas dwujęzycznych i jednojęzycznych. Badania obejmowały grupę 30 uczestników, po 15 osób w każdej klasie, w wieku 16-18 lat. Próbki mowy składały się z 3 zbiorów: angielski amerykański, angielski brytyjski i polski. Otrzymane wyniki mogą stanowić cenną wskazówkę zarówno dla naukowców jak i nauczycieli w szkolnictwie podstawowym, średnim oraz wyższym, a także inżynierów projektujących usługi i dostarczających treści.

### 12.1. Wprowadzenie

Najbardziej naturalnym sposobem komunikowania się ludzi jest mowa. Problem subiektywnej oceny jej jakości pojawił się wraz z pierwszymi systemami telefonicznymi, z uwagi na wprowadzane przez nich zakłócenia, co mogło powodować zarówno pogorszenie jakości samego sygnału mowy, jak i spadek zrozumiałości przekazywanych informacji. Szybki rozwój cyfrowych technik w telekomunikacji i radiofonii oraz multimediiów internetowych, wymusił konieczność tak poprawienia samej transmisji, jak też unormowanie sposobu oceny jakości przesyłanych sygnałów.

Mowa ludzka jest sygnałem złożonym, zmieniającym się w czasie i zawierającym wiele informacji. Tempo wypowiedzi wynosi ok. 100-150 słów na minutę [1], co sprawia, że mowa potoczna jest praktycznie sygnałem ciągłym. Ucho ludzkie jest w stanie rozróżnić wiele dźwięków, ale szczególnie wyczułone jest na dźwięki mowy, zawierające nie tylko treść (informację), ale też specyficzne cechy

głosu mówcy (barwa dźwięku, stan emocjonalny, intonacja, itp.). Percepcja sygnału mowy różni się od postrzegania innych dźwięków. Sugeruje się, że istnieje specjalny tryb percepcji mowy, tzw. mod mowy, który uruchamia się automatycznie podczas odbioru sygnału mowy, co potwierdzają wyniki badań [2,3]. Stevens i House [4] stwierdzili, że mod mowy włącza się niezależnie od tego, czy przed usłyszeniem dźwięku człowiek nastawiony był na mowę, czy też nie. Z kolei badania Remeza [3] pokazały, że mod mowy może być uaktywniony również przez sygnały o strukturze czasowej odpowiadającej sygnałowi mowy, a niebędącej mową.

W literaturze odnotowano też występowanie też występowanie zjawiska percepcji kategoryjnej [5, 6] oraz dualnej [7], co potwierdza istnienie specjalnego modu mowy. Pierwszą z nich charakteryzuje lepsza zdolność rozróżniania dźwięków ocenianych językowo jako różne, natomiast percepcja dualna charakteryzuje się tym, że pojedynczy przebieg akustyczny może być odbierany zarówno jako część sygnału mowy, jak i oddzielny dźwięk, niebędący mową.

Mimo wieloletnich badań nad percepcją sygnału mowy, nadal nie jest w pełni poznane i wyjaśnione zagadnienie, w jaki sposób mózg człowieka interpretuje złożone sygnały akustyczne, które mogą być elementami językowymi. Nie wiadomo dotąd, czy podstawowym elementem w procesie percepcji jest wyraz, sylaba, fonem lub inna cecha fonetyczna [8].

Korzystając z faktu, że skoro muzyka rozwija słuch i poczucie rytmu, co ma wpływ na percepcję poszczególnych atrybutów dźwięków muzycznych [9], jak również wykonywanie szeregu czynności przy wsparciu sygnałów dźwiękowych [10], autorzy postawili tezę, że podobne różnice powinny występować w przypadku osób posiadających określone zdolności lingwistyczne w zakresie percepcji sygnałów mowy.

Wyniki badań nad percepcją spółgłosek zwartych przez osoby dwujęzyczne prowadzone przez Caramazza, Yeni-Komshiana, Zurifa i Carbone'a [11] dla grupy językowej angielsko-francuskiej z Kanady oraz Williama [12, 13] dla osób posługujących się językiem angielskim i hiszpańskim, pokazują, że osoby dwujęzyczne mają jeden system percepcyjny, a nie jak przypuszczano dwa oddzielne dla każdego języka. Stwierdzono, że kategorie percepcyjne osób dwujęzycznych umiejscowione są pośrodku między kategoriami wyznaczonymi przez użytkowników każdego z badanych języków [13]. Badania pokazały również wyraźny wpływ doświadczenia językowego na percepcję mowy [14]. Dlatego postanowiono przeprowadzić badania oceny jakości mowy na grupie składającej się z osób dwujęzycznych. Celem prac było określenie różnicy w postrzeganiu sygnału mowy przez polskich nastolatków w wieku 16-18 lat.

## 12.2. Eksperyment

### 12.2.1. Grupa badawcza

Grupa badawcza składała się z 30 otologicznie normalnych nastolatków z klasy dwujęzycznej i jednojęzycznej, po 15 osób w każdej klasie.

Grupa dwujęzyczna obejmowała uczniów polskich posługujących się biegle zarówno językiem polskim jak i angielskim. Każda z osób rozpoczęła edukację w szkole prywatnej lub publicznej z językiem wykładowym angielskim. Poczynając od szkoły podstawowej, aż po średnią, wszystkie przedmioty wykładane były po angielsku. Każdy uczeń posługuje się oboma językami w życiu codziennym.

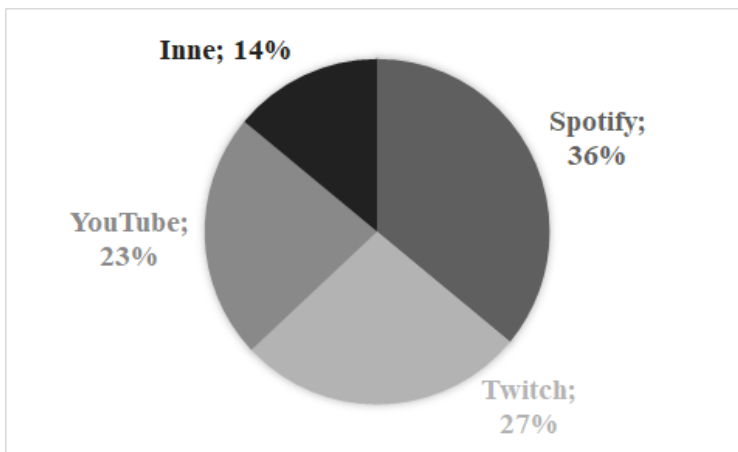
Grupa jednojęzyczna także składała się z uczniów polskich, którzy biegle władają językiem polskim (język ojczysty). Z kolei język angielski jest ich pierwszym wyborem, jeżeli chodzi o kontakty międzynarodowe i komunikację z zagranicą. Każda osoba rozpoczęła naukę w szkole prywatnej lub publicznej z językiem wykładowym polskim. Poczynając od szkoły podstawowej, aż po średnią, wszystkie przedmioty wykładane były po polsku. Wyjątkiem oczywiście był język obcy, w tym wypadku język angielski. Każdy uczeń posługuje się językiem polskim w życiu codziennym. Z kolei znajomość języka angielskiego jest na poziomie zaawansowanym.

### 12.2.2. Materiał testowy

Sygnaly testowe stanowiły próbki mowy zaczerpnięte z zasobów ITU-T P.501 [15]. W tym zaleceniu znajduje się wiele sygnałów (list zdaniowych), w różnych językach. Każdy plik składa się z dwóch zdań, odczytywanych przez lektora męskiego (jeden z dwóch osobników) lub żeńskiego (również jeden z dwóch osobników). Po wstępnej analizie, ostatecznie wytypowano 3 zbiory: angielski amerykański (AE), angielski brytyjski (EN) oraz polski (PL).

Pliki oryginalne dostępne były w formacie WAV 16-bit PCM. Następnie każdy plik został poddany działaniu kodeka Ogg Vorbis, z szybkością bitową wynoszącą 8, 16 oraz 24 kbit/s. Częstotliwość próbkowania wynosiła 44,1 kHz, podobnie jak w wielu popularnych usługach i systemach transmisji sygnałów fonicznych [16].

Kodek ten wybrano po przeprowadzeniu wstępnej ankiety dotyczącej popularnych usług strumieniowych. Jak wykazały wyniki (rys. 12.1), najpopularniejszą okazał się Spotify (36%).



Rys. 12.1. Popularne usługi strumieniowania sygnałów dźwiękowych

Inne usługi, takie jak Twitch (27%), YouTube (23%) oraz pozostałe (w tym Apple Music, Open.FM), uzyskały mniej punktów procentowych.

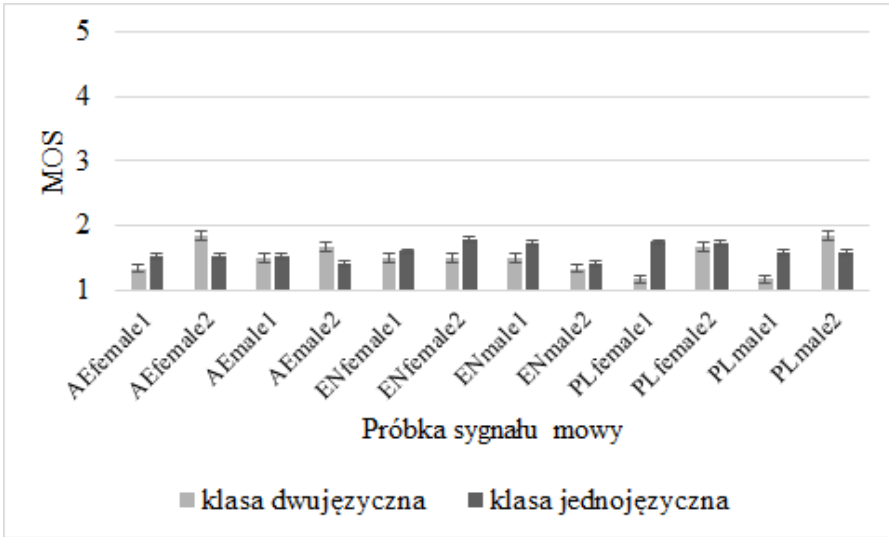
### 12.2.3. Pomiar jakości

Zadaniem każdego systemu transmisji mowy jest zapewnienie wysokiej jakości i zrozumiałości sygnałów mowy. Z uwagi na zmienne parametry łącza, związane np. z pasmem, opóźnieniem, utratą pakietów, itd., warunki mogą ulec pogorszeniu. Mówimy wtedy o dwóch pojęciach jakości: obiektywnej (QoS – Quality of Service), wyrażanej jako techniczne parametry systemu oraz subiektywnej (QoE – Quality of Experience), wyrażanej jako odczucia słuchaczy.

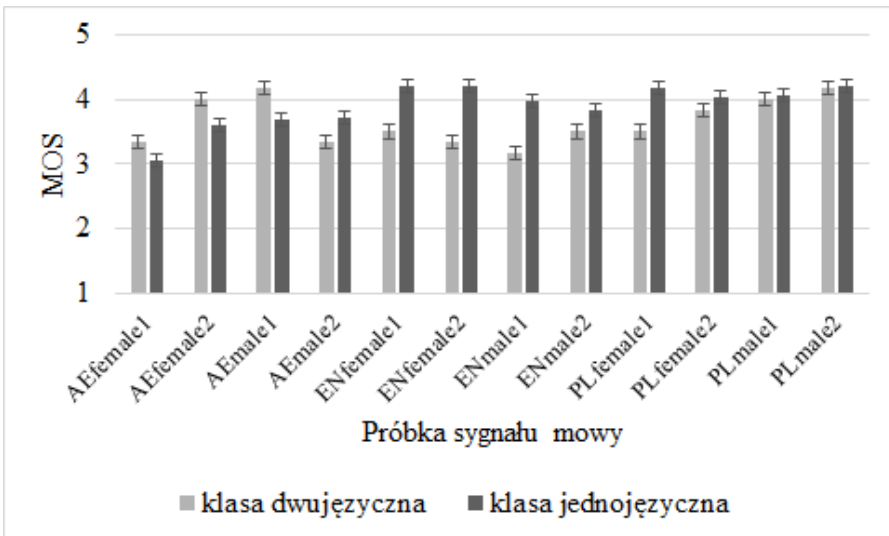
Badania odsłuchowe wykonano przy użyciu słuchawek zamkniętych Beyerdynamic Custom One. Uczestników poproszono o dokonanie oceny w 5-stopniowym wariancie skali MOS (Mean Opinion Score), od 1 (jakość zła) do 5 (jakość doskonała), zgodnie z zaleceniem ITU-R BS 1284 [17]. Pojedyncza sesja trwała ok. 10 minut. Każda osoba dokonywała oceny samodzielnie. Podczas fazy treningowej, w której możliwe było ustawienie poziomu głośności według własnych upodobań, zapoznano uczestników z celem badania.

### 12.3. Wyniki

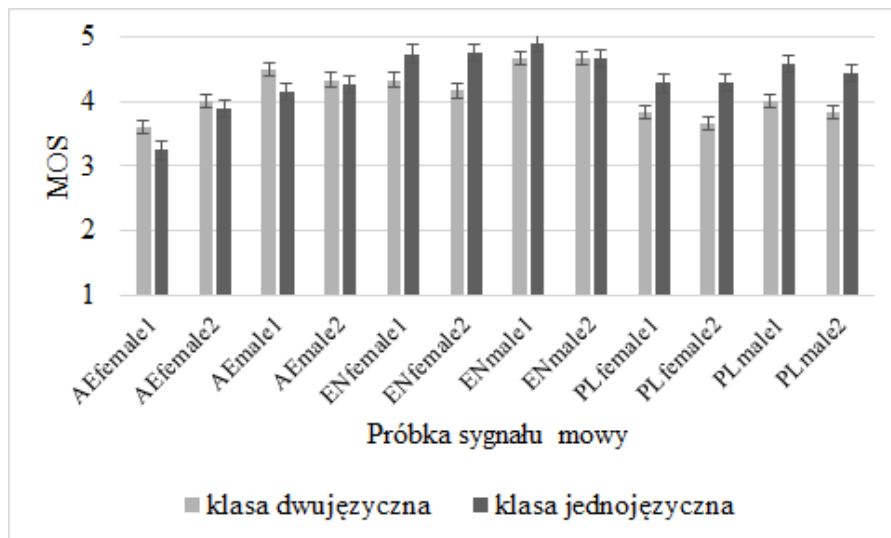
Wyniki przeprowadzonych badań, uwzględniających klasy jednojęzyczne i dwujęzyczne, obejmujące próbkę sygnałów mowy w języku angielskim amerykańskim (AE), angielskim brytyjskim (EN) oraz polskim (PL), w tym trzy szybkości bitowe (8, 16 i 24 kbit/s), przedstawiono na rys. 12.2–12.4.



Rys. 12.2. Ocena sygnałów mowy kodowanych z szybkością bitową wynoszącą 8 kbit/s



Rys. 12.3. Ocena sygnałów mowy kodowanych z szybkością bitową wynoszącą 16 kbit/s



Rys. 12.4. Ocena sygnałów mowy kodowanych z szybkością bitową wynoszącą 24 kbit/s

Otrzymane wyniki poddano przetwarzaniu z użyciem algorytmu ANOVA (Analysis of Variance). Przedział ufności ustawiono na poziomie 95% ( $\alpha=0,05$ ). Dyspersja wyniosła mniej niż 10% wartości średniej. Należy zaznaczyć, że żaden z uczestników nie był poinformowany o szybkości bitowej aktualnie ocenianego pliku. Z kolei pliki w ramach pojedynczego zestawu językowego były prezentowane w losowej kolejności. Oznaczano je jedynie jako lektor żeński lub męski.

Otrzymane wyniki wyraźnie pokazują, że szybkość bitowa wynosząca 8 kbit/s nie jest do zaakceptowania. Wszystkie próbki otrzymały ocenę na poziomie ok. 2,0 (jakość słaba) w 5-stopniowej skali MOS. Ponadto osoby dwujęzyczne często okazywały się bardziej krytyczne i bardziej wrażliwe, jeżeli chodzi o kodowanie z najniższą z badanych przepływności.

W przypadku średniej szybkości bitowej wynoszącej 16 kbit/s, tylko niektóre próbki (lektor żeński w dialekcie brytyjskim oraz lektor żeński i męski dla języka polskiego) okazały się wystarczająco dobre. Ocenę na poziomie 4,0 uzyskano w przypadku grupy jednojęzycznej. Osoby dwujęzyczne ponownie okazały się bardziej wymagającymi użytkownikami. Wyraźna jest różnica w przypadku zestawu angielskiego brytyjskiego (EN). W przypadku angielskiego-amerykańskiego (AE) wyniki okazały się zgoła inne. Dla języka polskiego (PL) uzyskano podobne oceny, jedynie z lekką różnicą w przypadku próbek odczytywanych przez lektora żeńskiego.

Dla najwyższej przepływności wynoszącej 24 kbit/s, osoby dwujęzyczne okazały się bardziej krytyczne przy ocenie próbek mowy w języku polskim (PL) oraz angielskim brytyjskim (EN). W przypadku angielskiego amerykańskiego (AE), dla każdego lektora żeńskiego i męskiego, osoby dwujęzyczne oceniły te próbki znacznie wyżej niż osoby jednojęzyczne.

Podsumowując wyniki dla różnych dialektów języka angielskiego, osoby jednojęzyczne preferują brytyjski wariant (EN), ponieważ oceniły te próbki znacznie wyżej niż wariant amerykański (AE), i to niezależnie od szybkości bitowej. Z drugiej strony osoby dwujęzyczne częściej oceniały wyżej próbki angielskiego amerykańskiego (AE). Tendencja ta była wyraźna, niezależnie od szybkości bitowej. Język polski (PL), będący mową ojczystą dla obu grup, wykazał, że osoby dwujęzyczne są bardziej wyczułone na zakłócenia wprowadzane przez kodowanie stratne i kompresję. W każdym przypadku, niezależnie od szybkości bitowej, lektora żeńskiego czy męskiego, oceny były zauważalnie niższe, w porównaniu do grupy jednojęzycznej.

Otrzymane wyniki świadczą o wpływie zdolności językowych na ocenę jakości. Wpływ ten może mieć swoje źródło w większym wyczuleniu na brzmienie (barwę) głosu, która z kolei jest bardziej zniekształcona przy niskich szybkościach bitowych, przy prawie nieziennej ocenie zrozumiałości i wyrazistości [18, 19]. Warto także wspomnieć, że wraz ze zmniejszeniem szybkości bitowej, w ocenianych sygnałach mogą pojawić się dodatkowe zakłócenia w postaci szumów czy trzasków, które mogą powodować maskowanie pewnych składowych związanych z intonacją czy z artykulacją poszczególnych głosek. Nie spowoduje to spadku zrozumiałości mowy, natomiast może doprowadzić do degradacji jej jakości [20, 21].

## 12.4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników można określić, że dla języka angielskiego amerykańskiego (AE) osoby jednojęzyczne okazały się bardziej wymagające, niezależnie od szybkości bitowej. Najwyraźniej, jako ludzie z mniejszym doświadczeniem językowym, preferują oni dialekt brytyjski. Z drugiej strony, w przypadku pozostałych zestawów, wyniki są zupełnie odwrotne. Dla grupy dwujęzycznej dialekt brytyjski okazał się bardziej wymagający, niezależnie od szybkości próbkowania i lektora. Z kolei język polski, będący mową ojczystą dla obu grup, otrzymał niższe oceny w przypadku grupy dwujęzycznej.

Podsumowując wyraźnie widać, że umiejętności językowe mają znaczący wpływ na postrzeganie i subiektywne odczucia użytkowników. Zauważono, że osoby z klasy jednojęzycznej preferują dialekt brytyjski. Z kolei osoby dwujęzyczne wyżej oceniają dialekt amerykański. Natomiast podczas analizy języka polskiego osoby dwujęzyczne są w stanie zaobserwować i wskazać więcej zniekształceń w przetworzonym sygnale.

Wyniki przeprowadzonych badań mogą znaleźć zastosowanie w dydaktyce i szkolnictwie na poziomie podstawowym, średnim oraz wyższym, a także przy projektowaniu usług i systemów transmisji mowy, ze szczególnym uwzględnieniem systemów rekomendacji, sztucznej inteligencji i przetwarzania dużych zasobów danych [22].

## Bibliografia

- [1] S. Brachmański, *Wybrane zagadnienia oceny jakości transmisji sygnału mowy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015.
- [2] A. S. House, K. N. Stevens, T. T. Sandel, J. B. Arnold, *On the learning of speechlike vocabularies*, Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour, 1(2), 133–143, 1962.
- [3] R. E. Remez, P. E. Rubin, D. B. Psoni, T. D. Carell, *Speech perception without traditional speech cues*, Science, 212, 947–950, 1981.
- [4] K. N. Stevens, A. S. House, *Speech perception*, w: *Foundations of modern auditory theory*, red. J. Tobias, Academic Press, Nowy Jork, 3–62, 1972.
- [5] A. M. Liberman, F. S. Cooper, D. P. Shankweiler, M. Studdert-Kennedy, *Perception of the speech code*, Psychological Review, 74(6), 431–461, 1967.
- [6] F. S. Cooper, P. C. Delattre, A. M. Liberman, A. M. Borst, L. J. Gerstman, *Some experiments in the perception of synthetic speech sounds*, Journal of the Acoustical Society of America, 24(6), 597–606, 1952.
- [7] T. C. Rand, *Dichotic release from masking for speech*, Journal of the Acoustical Society of America, 55, 678–680, 1974.
- [8] B. C. J. Moore, *Wprowadzenie do psychologii słyszenia*, PWN, Warszawa, 1999.



- [9] A. Miśkiewicz A., T. Rościszewska, J. Żera, J. Majer, B. Okoń-Makowska, *Detection and recognition of environmental sounds by musicians and non-musicians*, Archives of Acoustics, 43(4), 581–592, 2018.
- [10] W. Bogusz-Witzak, E. Skrodzka, H. Turkowska, *Influence of musical experience of blind and visually impaired young persons on performance in selected auditory tasks*, Archives of Acoustics, 40(3), 337–349, 2015.
- [11] A. Caramazz, G. H. Yeni-Komshian, E. B. Zurif, E. Carbone, *The acquisition of a new phonological contrast: The case of consonant in French-English bililinguals*, Journal of the Acoustical Society of America, 54, 421–428, 1973.
- [12] L. Williams, *The perception of stop consonant voicing by Spanish-English bilinguals*, Perception and Psychophysics, 21(4), 289–297, 1977.
- [13] J. B. Gleason, N. B. Ratner, *Psycholingwistyka*, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk, 2005.
- [14] W. Strange, J. J. Jenkins, *Role of linguistic experience in the perception of speech*, w: *Perception and experience*, red. R. D. Walk, H. J. Pick, Plenum Press, Nowy Jork, 125–169, 1978.
- [15] ITU Recommendation P.501, *Test signals for telecommunication systems*, 2017.
- [16] P. Falkowski-Gilski, *On the consumption of multimedia content using mobile devices: a year to year user case study*, Archives of Acoustics, 45(2), 321–328, 2020.
- [17] ITU Recommendation BS.1284, *General methods for the subjective assessment of sound quality*, 2003.
- [18] M. Kin, S. Brachmański, *Quality assessment of musical and speech signals broadcasted via single frequency network DAB*, International Journal of Electronics and Telecommunications, 66(1), 139–144, 2020.
- [19] S. Prygoń, M. Kin, *Badania zauważalności zmian sceny dźwiękowej sygnałów poddanych różnym rodzajom kompresji*, XVII Sympozjum Inżynierii i Reżyserii Dźwięku ISSET, Warszawa, 2017.
- [20] S. Brachmański, M. Kin, *Quality evaluation of sound broadcasted via DAB+ system based on a single frequency network*, 144<sup>th</sup> Convention of the Audio Engineering Society, Mediolan, 2018.
- [21] S. Brachmański, A. Dobrucki, N. Rurzyńska, P. Zemankiewicz, *Jakość sygnału mowy emitowanego w lokalnej radiofonii cyfrowej w wybranych punktach Wrocławia*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 7–8, 324–327, 2020.
- [22] I. Jeena Jacob, S. Kolandapalayam Shanmugam, S. Piramuthu, P. Falkowski-Gilski (red.), *Data intelligence and cognitive informatics*, Proceedings of ICDICI 2020, Springer, Singapur, 2021.



## Rozdział 13

# Zjawisko masking release – wpływ wieku i wielkości ubytku słuchu

Anna Pastusiak<sup>1</sup>, Anna Warzybok<sup>2</sup>, Jędrzej Kociński<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UAM Poznań, Wydział Fizyki, Katedra Akustyki

<sup>2</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

e-mail: [anna.pastusiak@amu.edu.pl](mailto:anna.pastusiak@amu.edu.pl)

Jednym z parametrów mogących opisywać zdolność do prawidłowej percepcji mowy, jest tzw. masking release. Przeanalizowano wyniki pomiarów progów zrozumiałości mowy stwierdzając, iż osoby normalnie słyszące lub z niewielkimi ubytkami słuchu mogą efektywnie wykorzystać tę część sygnału użytecznego (mowy), która występuje w „luce” maskera (związanej z fluktuacją jego obwiedni), a więc prezentowanej niejako w ciszy.

### 13.1. Wprowadzenie

Mowa stanowi system elementów semiotycznych (pierwotnie dźwiękowych, wtórnie pisemnych), który w określonym czasie i wspólnocie pełni podstawową funkcję komunikacyjną, a który został utworzony w toku biologicznej i socjalnej ewolucji. Pod pojęciem komunikacji z reguły rozumie się natomiast zdolność do wyrażania bądź wymiany myśli czy informacji, a także do gromadzenia i przekazywania wiedzy [1] po uprzedniej recepcji bodźca.

Odbiór mowy zależny jest od wielu czynników. Na najniższym poziomie należą do nich przede wszystkim słyszalność, wykrywalność lub lokalizacja dźwięku, a także możliwość różnicowania mowy warunkowana cechami dystynktywnymi danego języka oraz aspektami werbalnymi i niewerbalnymi [2]. Badając mowę, należy zatem brać pod uwagę nie tylko jej parametry fizyczne, ale i nacechowanie emocjonalne, a także aspekty związane z procesem jej percepcji – zakresem dynamiki, rozdzielczością częstotliwościową, czułością ucha (szybkością analizy). Nie mniej istotna jest umiejętność uczenia się i zapamiętywania. Istotne są również warunki, w jakich mowa jest prezentowana, a więc przede wszystkim czy towarzyszą jej sygnały zakłócające.

Prawidłowa percepcja mowy w warunkach rzeczywistych jest znacznie bardziej wymagająca niż w ciszy. Dotyczy to zwłaszcza osób z ubytkami słuchu, w szczególności o charakterze czuciowo-nerwowym. Występujące wówczas trudności związane są nie tylko z ograniczoną percepcją sygnału użytecznego, z uwagi na niekorzystny stosunek sygnału do szumu (SNR), ale także często ze współistniejącymi deficytami pozasłuchowymi. Łączenie w badaniach naukowych jak i praktyce audiologicznej tak wielu aspektów, choć żmudne i często wymagające interdyscyplinarnego podejścia, jest jednak konieczne, by

możliwe było udoskonalenie procedur diagnostyki słuchu, dopasowania aparatów słuchowych, dokładniejsza ocena zysku z protezowania, a w efekcie – zwiększenie możliwości swobodnej percepcji.

### 13.2. Testy zrozumiałości mowy

Oczywistym jest zatem, że z uwagi na fakt, iż odbiór, przetwarzanie, a w efekcie prawidłowe rozumienie mowy należą do podstawowych funkcji układu słuchowego człowieka, jednym z narzędzi pomocnych w ocenie zaburzeń słuchu winny być, prócz audiometrii tonalnej, badania z wykorzystaniem materiału językowego. Współcześnie występuje wiele odmian tego rodzaju testów, o różniących się właściwościach. W celach diagnostycznych, najczęściej stosowane są testy logatomowe, złożone z elementów nieniosących informacji semantycznej [3, 4] liczbowe – zapewniające znaczne skrócenie procedury pomiarowej i tym samym niwelujące wpływ „zmęczenia słuchu” (a w przypadku testu trypletowego, dość wierne odtworzenie progów zrozumiałości mowy [5]) oraz testy składające się z list wyrazów jednosylabowych [6]. Ograniczenie czasu badania i wykorzystanego materiału słownego nierzadko skutkuje mniejszą dokładnością pomiaru, stąd, od wielu lat, sugeruje się stosowanie testów zdaniowych, zapewniających wiarygodność i „wysoką efektywność” w szacowaniu zrozumiałości mowy [7–9].

Jednym z możliwych rozwiązań jest materiał językowy o strukturze matrycowej prezentowany zgodnie z określonym protokołem. Taka formuła testu została po raz pierwszy wykorzystana dla języka szwedzkiego przez Hagermana (1982). Opracował on macierz składającą się z 5 kolumn dziesięciowierszowych. Z każdej kolumny losowo wybierany jest jeden element, co umożliwia tworzenie pięciowyrazowych zdań. Dzięki temu, że ich zawartość semantyczna jest nieprzewidywalna (taka macierz pozwala na wygenerowanie 100 000 kombinacji zdaniowych), test może być wielokrotnie powtarzany, bez ryzyka, że osoba poddana badaniu nauczy się na pamięć materiału słownego, tym samym wpływając na wiarygodność uzyskanych wyników. Współcześnie test Matrix dostępny jest w kilkunastu językach, m.in. duńskim, rosyjskim, mandaryńskim [10] ale i polskim, opracowanym przez zespół pod kierownictwem Ozimka [11] (rys. 13.1).

|        |           |          |          |         |
|--------|-----------|----------|----------|---------|
| Adam   | bierze    | pięć     | białych  | dzwonów |
| Anna   | daje      | sześć    | czarnych | gazet   |
| Ewa    | kupi      | siedem   | dobrych  | klocków |
| Julia  | ma        | osiem    | drogich  | koszy   |
| Maciej | nosi      | dziewięć | dziwnych | okien   |
| Maria  | robi      | sto      | nowych   | opon    |
| Michał | sprzedaje | tysiąc   | pięknych | pilek   |
| Paweł  | widzi     | kilka    | starych  | soków   |
| Tomasz | woli      | dużo     | tanich   | stołów  |
| Zofia  | wygra     | wiele    | żółtych  | toreb   |
| Anna   | ma        | sto      | pięknych | opon    |

Rys. 13.1. Matryca testu Matrix

Z audiometrią mowy nierozzerwalnie związane są dwa pojęcia: wyrazistość i zrozumiałość. Pierwsze z nich stosuje się w odniesieniu do prawidłowej identyfikacji przez badanego głosek, sylab i logatomów.

Te ostatnie stanowią elementy fonetyczne, nieposiadające znaczenia semantycznego. Pojęcie zrozumiałości dotyczy natomiast struktur wyższego rzędu, mających określone nacechowanie semantyczne lub zawierające określoną treść myślową – słów oraz zdań. W diagnostyce spotyka się zarówno testy oceniające wyrazistość, jak i zrozumiałość. Wybór materiału testowego zależy przede wszystkim od tego, czy dąży się do oceny funkcji receptywnej drogi słuchowej, opartej głównie na fizycznych parametrach sygnału mowy, takich jak m.in. natężenie, skład widmowy, częstotliwość, czy funkcji integracyjnej, związanej z umiejętnością identyfikacji usłyszanych jednostek oraz prawidłowym rozpoznaniem treści w nich zawartych na podstawie słownika pamięci osobniczej. Aby określić zrozumiałość (lub wyrazistość), należy zaprezentować słuchaczowi listę pomiarową, a następnie określić, jaka część jej elementów została poprawnie powtórzona. Tak zdefiniowaną zrozumiałość lub wyrazistość można przedstawić prostą zależnością:

$$I = \frac{p}{n} \cdot 100\% \quad (13.1)$$

w której  $I$  stanowi zrozumiałość (najczęściej wyrażoną w procentach),  $p$  liczbę poprawnych odpowiedzi, a  $n$  liczbę wszystkich elementów testu.

Parametrem, który najczęściej określa się na podstawie pomiaru zrozumiałości mowy w określonych warunkach jest punkt na krzywej psychometrycznej (procentowa zrozumiałość mowy w funkcji poziomu prezentacji), dla którego wynosi ona 50%. Ze względu na redundancję języka, do zrozumienia mowy potocznej nie jest niezbędna pełna zdolność dyskryminacji poszczególnych dźwięków wchodzących w skład wypowiedzi. Sugeruje się, że przy 50% poprawnej identyfikacji jednostek językowych, słuchacz powinien, przy określonym poziomie intensywności bodźca, percypować znaczenie poszczególnych fraz języka [12], a tym samym zrozumieć komunikat. Wyznaczenie poziomu, przy którym badany prawidłowo rozpoznaje połowę zaprezentowanego materiału lingwistycznego jest zatem zasadne i może być wykorzystywane w diagnostyce. Wielkość tę określa się mianem progu rozumienia mowy – SRT (*Speech Reception Threshold*).

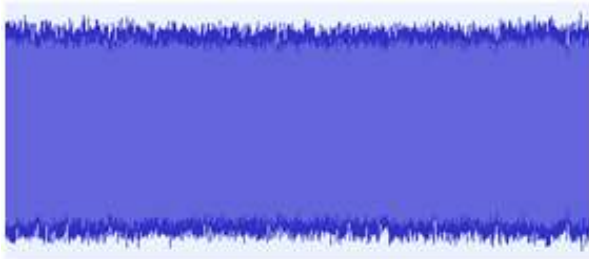
Badając zrozumiałość mowy należy bezwzględnie wziąć pod uwagę warunki, w jakich mowa ta jest prezentowana – tzn. czy występują inne sygnały, mogące ją zniekształcać lub maskować ze skutecznością zależną od ich cech fizycznych; zatem struktura maskera ma bezpośredni wpływ na zrozumiałość mowy wyrażoną w postaci wielkości SRT. Najbardziej ogólny podział wyróżnia maskowanie energetyczne i informacyjne [13]. W praktyce audiologicznej najczęściej wykorzystywany jest szum stacjonarny o takim samym średnim długoczasowym widmie jak materiał słowny. Jest to zatem maskowanie dość efektywne, głównie o charakterze energetycznym. Aby jeszcze dokładniej eksplorować temat percepcji, zarówno w odniesieniu do peryferyjnego układu słuchowego jak i przetwarzania informacji na wyższych piętrach drogi słuchowej, coraz częściej korzysta się również z bardziej złożonych sygnałów. Szczególnie interesujące wydaje się być w tym kontekście wykorzystanie szumów fluktuujących i związane z nimi zjawisko *listening in the gaps*. Osoby prawidłowo słyszące lub z niewielkimi ubytkami słuchu potrafią efektywnie wykorzystać część sygnału użytecznego przypadającą na „lukę” w szumie (związaną z fluktuacjami jego obwiedni), a więc prezentowaną niejako w ciszy. U osób z niedosłuchem funkcjonowanie tego mechanizmu jest znacznie ograniczone. Część informacji zawartej w sygnale mowy, mimo tego, że prezentowana bez szumu, jest dla nich niedostępna, ze względu na to, że znajduje się poniżej progu słyszenia i percepcyjnie nie może być wykorzystana [14].

### 13.3. Pomiar zrozumiałości mowy

W niniejszej pracy poddano analizie wyniki pomiarów zrozumiałości mowy przeprowadzonych z wykorzystaniem Polskiego Testu Zdaniowe Matrix wśród badanych ze słuchem prawidłowym oraz z niedosłuchem o charakterze odbiorczym. Zadaniem słuchacza było powtarzanie usłyszanych elementów testu językowego – ilość poprawnie rozpoznanych wyrazów decydowała o wielkości SRT, a więc

o stopniu zrozumienia mowy, gwarantującym swobodne porozumiewanie się. W celu wielowymiarowej analizy XXX, poza pomiarami w ciszy przeprowadzono prezentację testu w warunkach maskowania. W tym celu wykorzystano szum stacjonarny oraz o obwiedni fluktuującej.

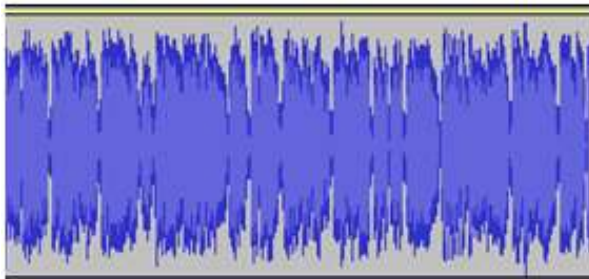
**Szum stacjonarny** (TSN – *test specific noise*) został wygenerowany na zasadzie wielokrotnej superpozycji zdań wchodzących w skład macierzy, na którą składają się elementy testu zdaniowego Matrix [11], stąd długoczasowe widmo powstałego w ten sposób szumu odpowiada widmu materiału słownego. Wykorzystanie tego rodzaju szumu ma zatem na celu głównie maskowanie energetyczne (rys. 13.2).



Rys. 13.2. Widmo szumu stacjonarnego TSN

**Szum icra5-250** – szum stacjonarny, zmodulowany obwiednią sygnału mowy (rys. 13.3).

Udowodniono, że szum tego rodzaju jest mniej efektywnym maskerem niż typowy szum stacjonarny ze względu na możliwość wykorzystania przez słuchacza, tzw. luk czasowych – *temporal dips* – maskera [14, 15].



Rys. 13.3. Widmo szumu fluktuującego icra5-250

W utrzymaniu dobrej zrozumiałości mowy prezentowanej na tle tego rodzaju sygnału maskującego wymagane są nie tylko efektywne funkcjonowanie peryferyjnego układu słuchowego, ale i odpowiednia rozdzielczość czasowa, umożliwiająca wykorzystanie fragmentu sygnału użytecznego przypadającego na lukę w szumie. W przypadku osób z niedosłuchem proces ten jest znacznie mniej efektywny niż u prawidłowo słyszących; pomimo że sygnał mowy w luce czasowej szumu jest niemaskowany, część zawartej w nim informacji jest niedostępna dla słuchaczy z ubytkiem, ze względu na podwyższony próg słuchu. Dodatkowo istotną rolę odgrywają deficyty właśnie w przetwarzaniu czasowym.

Osoby badane zostały przyporządkowane do określonych grup, w zależności od średniego progu słyszenia (średnia arytmetyczna dla częstotliwości 500, 1000, 2000 i 4000 Hz) wyznaczonego w badaniu

audiometrycznym poprzedzającym zasadniczą część pomiarów oraz w oparciu o klasyfikację zaproponowaną przez WHO, dzieląca ubytki słuchu na stopnie:

- **lekki** (średni próg słuchu: 21 - 40 dB HL) oznaczany w tej pracy jako **M**,
- **umiarkowany** (średni próg słuchu 41 – 70 dB HL) oznaczany jako **MO**,
- **znaczny** (średni próg słuchu: 71 – 90 dB HL) – oznaczony jako **S**
- oraz **głęboki**, w którym próg słuchu przekracza 90 dB HL.

Szczegółowe informacje dotyczące liczebności poszczególnych grup (N) średniego wieku oraz PTA wraz z odchyleniem standardowym (w nawiasie) przedstawiono w tabeli 13.1, w której:

- M – grupa z lekkim ubytkiem słuchu,
- MO – grupa z umiarkowanym u.s.
- S – grupa ze znacznym u.s.,
- yNH – młodszy prawidłowo słyszający (18-40 r.ż.),
- oNH – starsi prawidłowo słyszający (>40 r.ż.).

**Tabela 13.1**  
Grupy badanych (liczebność, wiek, próg słyszenia)

|            | <i>N</i>  | <i>wiek</i>        | <i>PTA</i><br><i>[dB HL]</i> |
|------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| <b>M</b>   | <b>19</b> | <b>66.3</b> (8.5)  | <b>32.4</b> (4.5)            |
| <b>MO</b>  | <b>27</b> | <b>73.3</b> (8.9)  | <b>50.9</b> (6.0)            |
| <b>S</b>   | <b>11</b> | <b>74.0</b> (9.5)  | <b>66.9</b> (7.8)            |
| <b>yNH</b> | <b>18</b> | <b>23.7</b> (2.6)  | <b>3.0</b> (3.9)             |
| <b>oNH</b> | <b>17</b> | <b>59.3</b> (12.3) | <b>19.3</b> (3.9)            |

Do pomiarów przeprowadzonych w pomieszczeniu spełniającym wytyczne ANSI S3.1-1999 (ograniczony poziom ciśnienia akustycznego otoczenia) wykorzystano odpowiednio skalibrowane audiometryczne słuchawki Sennheiser HDA200 i oprogramowanie Oldenburg Measurement Application (Hör-Tech).

## 13.4. Wyniki

Wartości średnie SRT w szumie stacjonarnym, fluktuującym oraz ciszy, wraz z odchyleniem standardowym (w nawiasie) przedstawiono w tabeli 13.2.

Ujemne wartości SRT, zmierzone w szumie stacjonarnym i zmodulowanym dla wszystkich grup badanych, poza osobami ze znacznym stopniem niedosłuchu, oznaczają, iż poziom sygnału maskującego [dB] mógł przewyższać poziom sygnału użytecznego, a słuchacz mimo to był w stanie prawidłowo powtórzyć 50% zaprezentowanego materiału językowego.

Jak wynika z przedstawionych danych, szum stacjonarny jest maskerem bardziej efektywnym niż icra5-250, na co wskazują niższe wartości SRT uzyskane w warunkach, gdy był on prezentowany.

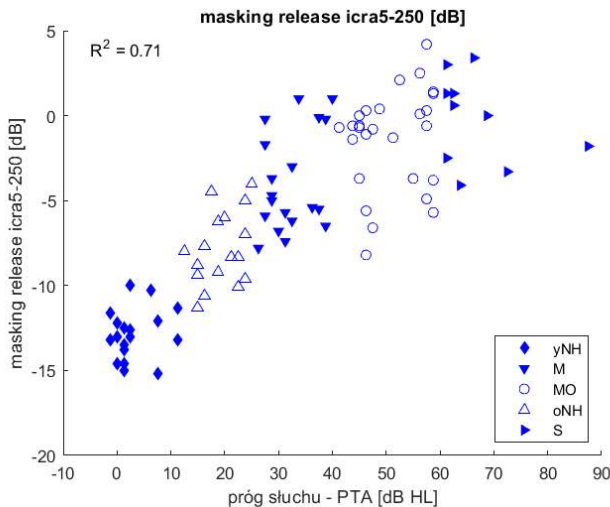
**Tabela 13.2**  
Wyniki pomiarów SRT

|            | <i>TSN</i>        | <i>icra5-250</i>   | <i>cisza</i>       |
|------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| <b>M</b>   | <b>-4.2</b> (1.7) | <b>-8.1</b> (3.6)  | <b>32.8</b> (8.5)  |
| <b>MO</b>  | <b>-0.2</b> (5.4) | <b>-1.6</b> (5.3)  | <b>48.0</b> (11.5) |
| <b>S</b>   | <b>5.5</b> (6.2)  | <b>5.3</b> (5.1)   | <b>68.9</b> (9.3)  |
| <b>yNH</b> | <b>-8.5</b> (1.4) | <b>-21.4</b> (2.3) | <b>15.8</b> (5.8)  |
| <b>oNH</b> | <b>-5.7</b> (1.3) | <b>-13.5</b> (2.4) | <b>23.6</b> (2.2)  |

Różnice pomiędzy średnimi progami zrozumiałości mowy osiągniętymi w tych dwóch scenariuszach pomiarowych świadczą o sile efektu związanego ze zjawiskiem *masking release*. Jego wielkość osiąga średnio 7.8 dB w przypadku starszych prawidłowo słyszących (oNH), a nawet 12.9 dB w przypadku młodszych (yNH).

Dla lekkiego (M) i umiarkowanego (MO) ubytku słuchu, są to wartości znacznie niższe, kolejno 3.9 oraz 1.4 dB. Badani ze średnimi progami słyszenia przekraczającymi 70 dB HL (S) w ogólności nie są w stanie wykorzystać luk w obwiedni sygnału zmodulowanego dla bardziej efektywnego rozumienia mowy w warunkach niekorzystnych pod względem akustycznym, co wyraża się poprzez oscylujące wokół zera wartości różnicy między SRT w szumie stacjonarnym i zmodulowanym (średnio 0.2 dB).

Analizując uzyskane dane, można wyciągnąć wniosek o zależności wielkości efektu *masking release* i stopnia ubytku słuchu. Faktycznie, wartości tych parametrów dobrze ze sobą korelują ( $R^2 = 0.71$ ) – im większy niedosłuch (wyrażony w tym przypadku poprzez wzrastający średni próg słyszenia (PTA)), tym bliższa 0 jest percepcyjna korzyść związana z pojawieniem się fluktuującej obwiedni (rys. 13.4).



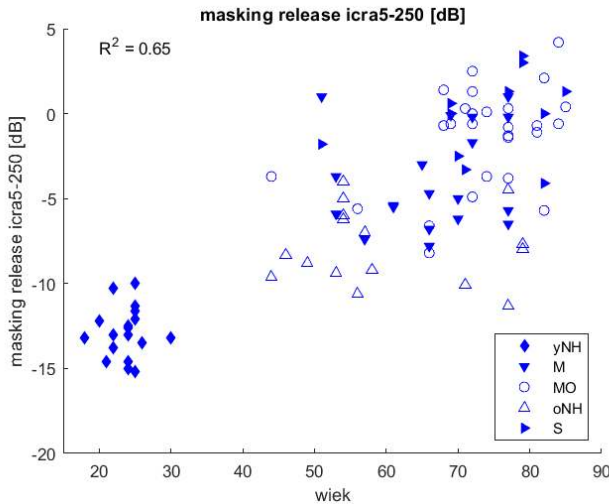
**Rys. 13.4.** *Masking release* a średni próg słuchu



W skrajnych przypadkach, kiedy zrozumiałość mowy w szumie stacjonarnym jest większa niż w szumie icra5-250, wielkość efektu masking release osiąga wartości dodatnie. Dotyczy to głównie słuchaczy z umiarkowanym (MO) i znacznym (S) ubytkiem słuchu.

Ciekawe obserwacje można poczynić, bardziej szczegółowo analizując wyniki uzyskane dla osób prawidłowo słyszających. Podczas gdy w grupie młodszych badanych (yNH) różnice progów zrozumiałości mowy w szumie stacjonarnym (TSN) i zmodulowanym icra5-250 w większości osiągają kilkanaście decybeli (między 10.0 a 15.2 dB), o tyle wśród słuchaczy starszych (oNH) są one średnio 5 dB mniejsze (od 4.0 do 11.3 dB).

Naturalnym krokiem wydaje się być zatem próba określenia związku pomiędzy wiekiem osoby badanej a korzyścią, którą czerpie z *masking release* (rys. 13.5)



Rys. 13.5. *Masking release* a wiek

Analizując dane uzyskane dla wszystkich badanych, niezależnie od grupy, do której należą, współczynnik korelacji przyjmuje wartość 0.65. Biorąc pod uwagę młodszych i starszych prawidłowo słyszających, związek ten jest silniejszy, a określający go współczynnik  $R^2$  wynosi 0.79. Brak zależności wieku i różnicy zrozumiałości mowy w różnych warunkach maskowania charakteryzuje natomiast wyniki uzyskane przez słuchaczy z ubytkiem słuchu –  $R^2 = 0.17$ .

Bardziej zasadna jest jednak w tym przypadku nie tyle wartość współczynnika korelacji, ile obserwacja rozproszenia wyników poszczególnych słuchaczy. Doskonałym przykładem może być grupa badanych z umiarkowanym ubytkiem słuchu (MO). Tylko wśród relatywnie wąskiego przedziału wiekowego, pomiędzy 65 a 70 rokiem życia, wartości *masking release* różnią się między sobą nawet o ok. 10 dB.

Ponadto, analizując wykres zależności w płaszczyźnie horyzontalnej, również można zauważyć, że zbliżony zysk w zrozumiałości mowy osiągają słuchacze z podobnym ubytkiem słuchu, ale różniący się wiekiem o niemal dwie dekady.

Co ciekawe, podobne prawidłowości można dostrzec w grupie starszych pacjentów ze słuchem prawidłowym. Jest to grupa bardzo jednorodna jeśli chodzi o średni próg słuchu określony badaniem audiometrycznym, jednak, w przeciwieństwie do grupy młodszej, zróżnicowana pod względem wieku (pomiędzy 44 a 77 r.ż.; mediana 54 lata). Zaskakujące jest, jak bardzo skrajne wielkości może przybie-

rać efekt *masking release*. Łatwo zaobserwować to nawet na wykresie. W badanej grupie są osoby, które pomimo braku deficytów słuchowych, mniej efektywnie wykorzystywały zjawisko *listening in the gaps* niż ich rówieśnicy z lekkim, a nawet średnim stopniem niedosłuchu.

## 13.5. Podsumowanie

Odbiór i prawidłowe przetwarzanie sygnału mowy jest procesem wielopłaszczyznowym, uwzględniającym różne poziomy systemy słuchowego, a dane pozyskiwane z każdego z nich służą eliminowaniu nieznaczności lub nawet korygowaniu błędów w następnych etapach analizy. Na podstawowym poziomie uwzględniać należy prawidłowość czynności peryferyjnego układu słuchowego (często z uwzględnieniem określonych zakresów częstotliwości). Istotny wpływ podczas percepcji dźwięków mowy pełnią także inne aspekty pozasłuchowe np. ruchy twarzy i warg. Szereg badań [16] dowodzi istnienia sprzężenia pomiędzy informacją akustyczną i wizualną docierającą do mózgu. Doskonale ilustruje tę zależność tzw. efekt McGurka.

Analizując procesy związane z dekodowaniem leksykalnym sygnału, należy uwzględnić również wpływ intensywności zaangażowanej w percepcję uwagi (rozumianej jako proces kognitywny, który spośród wielu docierających bodźców wybiera tylko niektóre z nich, aktywując adekwatne neurony, a w efekcie umożliwia utrwalenie określonego bodźca), progu pobudzenia określonej jednostki leksykalnej czy szybkości połączeń neuronalnych.

Z prac Moore'a [17] wynika, że ważnym czynnikiem w percepcji mowy jest również znajomość reguł, jakimi rządzi się dany język.

Nie bez znaczenia pozostają czynniki zewnętrzne, bezpośrednio związane z obecnością sygnałów niepożądanych, zakłócających. W opisywanym badaniu przytoczono przykład szumu stacjonarnego, powszechnie stosowanego w diagnostyce, jak i zmodulowanego.

Uzyskane wyniki wskazują, że zjawisko *masking release* jest mniej skuteczne w przypadku osób z ubytkiem słuchu. Na uwagę zasługuje fakt, że dla niektórych badanych zrozumiałość mowy w szumie fluktuującym jest gorsza niż w szumie stacjonarnym; oprócz procesów związanych z przetwarzaniem informacji na poziomie poznawczym i/lub rozdzielczości czasowej i częstotliwościowej, także sam próg słuchu odgrywa ważną rolę w percepcji mowy w różnych warunkach maskowania.

Wszystkie wymienione czynniki przemawiają za tym, że wytwarzanie oraz odbiór mowy są zjawiskami skomplikowanymi, trudnymi do jednoznacznego zdefiniowania. Tym trudniej badać je, gdy dodatkowo u danej jednostki występują problemy z prawidłową percepcją i analizą, które wynikać mogą z obecności nieprawidłowości w obrębie szeroko rozumianej drogi słuchowej, wiodącej od struktur ucha zewnętrznego do określonych ośrodków mózgowych. Zasadne wydaje się być w tym kontekście prowadzenie wnikliwych, a zarazem szeroko zakrojonych badań dotyczących wpływu czynników słuchowych i pozasłuchowych na percepcję sygnałów akustycznych (ze szczególnym naciskiem na mowę, jako sygnał najbardziej istotny z punktu widzenia funkcjonowania człowieka w środowisku), zarówno w ujęciu ilościowym, jak i jakościowym. Ważne jest również podjęcie prób mogących w jak największym stopniu zrekomensować występujące dysfunkcje, w efekcie przyczyniając się do poprawy zrozumiałości mowy poprzez udoskonalenie obecnie stosowanych rozwiązań oraz opracowanie nowych.

## Podziękowania

Dziękuję dr Annie Warzybok za ogromne wsparcie (nie tylko merytoryczne!) w realizacji pomiarów (w ramach projektu Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Multilingual model-based rehabilitative

audiology) oraz dr. hab. Jędrzejowi Kocińskiemu, który wprowadził mnie w świat psychoakustyki i badań dotyczących percepcji mowy, uważanej za najbardziej ludzkie osiągnięcie ewolucyjne (Vetulani).

## Bibliografia

- [1] A. Żychliński, *Homo loquens. O różnicy antropologicznej*, Teksty Drugie, 5, 56–84, 2009.
- [2] G. Demenko, *Percepcja mowy w zarysie*, w: Obrębowski A. (pod redakcją), *Wybrane zagadnienia z audiometrii mowy*, Wydawnictwo Naukowe UM w Poznaniu, Poznań, 33–57, 2011.
- [3] S. Iwankiewicz, *Audiometria mowy*, Otolaryngologia Polska, 15–27, 1961.
- [4] S. Brachmański, P. Staroniewicz, *Fonetyczna struktura materiału testowego stosowanego w subiektywnych pomiarach jakości mowy*, Speech and Language Technology, 3, 71–80, 1999.
- [5] E. Ozimek, *Development and evaluation of Polish digit triplet test for auditory screening*, Speech Communication, 51 (4), 307–316, 2009.
- [6] A. Pruszczyk, G. Demenko, L. Richter, T. Wika, *New articulation lists for speech audiometry. Part II.*, Otolaryngol. Pol., 48, 56–62, 1994.
- [7] R. Plomp, A. M Mimpfen, *Improving the reliability of testing the speech reception threshold for sentences*, Audiology, 18, 43–53, 1979.
- [8] M. Nilsson, S. D. Soli, J. A. Sullivan, *Development of the Hearing in Noise Test for the measurement of speech reception thresholds in quiet and in noise*, J Acoust Soc Am, 95, 1085–1099, 1994.
- [9] B. Kollmeier, M. Wesselkamp, *Development and evaluation of a sentence test for objective and subjective speech intelligibility assessment*, J Acoust Soc Am, 102 (4), 1085–1099, 1997.
- [10] B. Kollmeier, A. Warzybok, *The multilingual matrix test: Principles, applications, and comparison across languages: A review*, International Journal of Audiology, 54 (2), 3–16, 2015.
- [11] E. Ozimek, A. Warzybok, D. Kutzner, *Polish sentence matrix test for speech intelligibility measurement in noise*. Int J Audiol, 49, 444–454, 2010.
- [12] A. Sekula, P. Świdziński, *Audiometria mowy w protezowaniu i rehabilitacji słuchu*, w: Obrębowski A. (pod redakcją), *Wybrane zagadnienia z audiometrii mowy*.
- [13] N. Durlach, *Informational masking: Counteracting the effects of stimulus uncertainty by decreasing target-masker similarity*, J. Acoust. Soc. Am., 114 (1), 368–379, 2003.
- [14] K. Wagener, T. Brand, B. Kollmeier, *The role of silent intervals for sentence intelligibility in fluctuating noise in hearing-impaired listeners*. Int J Audiol, 45 (1), 26–33, 2006.
- [15] J. M. Festen, R. Plomp, *Effects of fluctuating noise and interfering speech on the speech-reception threshold for impaired and normal hearing*. J Acoust Soc Am., 88, 1725–1736, 1990.
- [16] P. Liberman, *The Evolution of Human Speech*, Current Anthropology, 48 (1), 39–64, 2007.
- [17] C. J. Moore Brian, *Wprowadzenie do psychologii słyszenia*, PWN, Warszawa, 1999.



## Rozdział 14

# Ewaluacja parametru najmniejszego słyszalnego kąta (*Minimum Audible Angle*) w sferycznym ambisonicznym systemie odtwarzania 3-go rzędu

Katarzyna Sochaczewska, Paweł Małecki, Jerzy Wiciak

*Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki*

e-mail: [katarzyna.sochaczewska@agh.edu.pl](mailto:katarzyna.sochaczewska@agh.edu.pl)

Technologie dźwięku przestrzennego zyskują rosnące zainteresowanie. Jedną z nich jest oparta na syntezie pola akustycznego ambisonia, coraz szerzej obecna w zastosowaniach komercyjnych. Zjawiska psychoakustyczne charakterystyczne dla mechanizmów słyszenia przestrzennego stanowią obecnie margines badawczy w jej testowaniu. Ich zweryfikowanie może przyczynić się do ulepszenia narzędzi i technik do pracy w tej technologii (m.in. uzyskiwania bardziej przekonujących przestrzennych efektów). Celem tego badania jest porównanie dokładności lokalizacji źródła dźwięku odtworzonego przy użyciu 3-go rzędu ambisonii na wielokanałowym systemie odsłuchowym z dostępnymi badaniami przy użyciu fizycznych źródeł dźwięku. Testy przeprowadzone z użyciem sygnałów tonalnych i szumu gaussońskiego pozwoliły na wykreślenie funkcji psychometrycznych oraz wyznaczenie tzw. parametru Minimum Audible Angle (MAA, najmniejszy słyszalny kąt).

### 14.1. Wstęp teoretyczny i motywacja

Głównym celem pracy jest zbadanie mechanizmów związanych z percepcją ruchu pozornego źródła dźwięku w systemie ambisonicznym. Zjawiska i mechanizmy związane ze słyszeniem przestrzennym to złożone procesy i są badane głównie poprzez dwa podstawowe rodzaje eksperymentów psychofizycznych [1]:

1. metodą limitów, w percepcji lokalizacji dźwięku stosowana głównie przy testach związanych z lokalizacją stacjonarnych źródeł dźwięku. Polega zazwyczaj na punktowym wskazaniu kierunku, z którego dźwięk jest percepowany.
2. różnicowej, która polega na porównaniu dwóch następujących po sobie próbek dźwięku.

Drugi z przytoczonych sposobów pozwala na badanie dyskryminacji postrzeganego kierunku źródła dźwięku względem próbki referencyjnej. To z kolei umożliwia ustalenie jednego z najbardziej podstawowych własności słyszenia przestrzennego, jakim jest najmniejszy rozpoznawalny kąt słyszenia (ang. *minimum audible angle*, MAA) [2]. Definiuje się go jako najmniejszą rozpoznawalną różnicę (ang. *just noticeable difference*, JND) w determinacji kierunku zmiany położenia następujących po sobie próbek

dźwięku (w którą stronę nastąpiło przemieszczenie pozornego źródła dźwięku – w prawą, czy w lewą względem położenia referencyjnego). Pierwszą udokumentowaną próbę zmierzenia tego parametru stanowi eksperyment przeprowadzony przez Mills'a w 1958 r. [2] przy użyciu fizycznego, mechanicznie przesuwanego źródła dźwięku. Prezentowana praca bezpośrednio nawiązuje do metod i wyników z cytowanej pozycji.

## 14.2. Cel i podstawa teoretyczna

### 14.2.1. Mechanizmy słyszenia przestrzennego

Nie da się wskazać jednego czynnika czy procesu odpowiedzialnego za słyszenie przestrzenne i postrzeganie ruchu. Ponadto, różne mechanizmy słyszenia nakładają się na siebie. W zależności od zakresu częstotliwości, poziomu ciśnienia akustycznego źródła dźwięku, efektów maskowania, odpowiedzi pomieszczenia, doświadczenia słuchacza i innych, czynnik decydujący o tym, który z mechanizmów jest wykorzystywany, oparty jest na zjawisku określanym jako werdykt przeważający. W badaniach z zakresu neurofizjologii zwierząt można znaleźć wiele wyników badań [3, 4] przeprowadzanych w zakresie mechanizmów słyszenia. Wskazują one na istnienie odizolowanych komórek o zróżnicowanej budowie, odpowiedzialnych za dwa podstawowe mechanizmy lokalizacji źródeł dźwięku, oparte na międzyusznych różnicach fazowych i amplitudowych (ang. *Interaural Time Difference*, ITD i *Interaural Level / Intensity Difference*, ILD/IID). Pokrywają się one z publikacjami dotyczącymi ludzkiego mechanizmu słyszenia przestrzennego [3]. Co istotne, w obu przypadkach stwierdzono rozbieżności pomiędzy wynikami dotyczącymi odpowiedzi dla stacjonarnych i poruszających się źródeł dźwięku [4]. W związku z powyższym, można stwierdzić, że nie tylko same mechanizmy są złożone, ale także ich zasada działania nie jest do końca poznana. Badania [5] z zakresu psychofizyki wskazują, że system nerwowy przetwarza impulsy w sposób nieliniowy, co dodatkowo utrudnia wnioskowanie w przypadku mechanizmów słyszenia przestrzennego.

### 14.2.2. Badanie referencyjne

W tej publikacji skupiamy się na jednym z podstawowych parametrów, wspomnianym wyżej najmniejszym słyszalnym kącie (MAA) [2]. Parametr ten wydaje się być szczególnie istotny w przypadku technologii ambisonicznej ze względu na bezpośredni związek z rozdzielczością przestrzenną lokalizacji pozornego źródła dźwięku. W przypadku badań z zastosowaniem fizycznego źródła dźwięku precyzja dyskryminacji MAA jest bardzo wysoka i wynosi poniżej  $4^\circ$  dla płaszczyzny środkowej, czyli dla zerowego kąta azymutalnego względem głowy słuchacza, przy próbkach w zakresie częstotliwości od 200 do 4000 Hz. Najmniejszą wartość ( $1^\circ$  i poniżej) osiąga się zazwyczaj w okolicach 500 Hz. Dla kąta azymutalnego w zakresie  $75^\circ - 90^\circ$  wartości te wzrastają do  $7^\circ$  i więcej [2]. W tych eksperymentach celowo usztywniano głowę słuchacza, aby wykluczyć wpływ jej ruchów wspomagających lokalizację kierunku. Do badania stosowano metody alternatywnego wyboru 2AFC (ang. *Two-Alternative Forced Choice*) odtwarzając dwie następujące po sobie próbki zlokalizowane w różnych miejscach oddzielone krótką przerwą. Jako bodziec zastosowano ton prosty.

Dodatkowo, prowadzone są też intensywne badania nad sposobami udzielania odpowiedzi dotyczących lokalizacji źródła dźwięku i błędów, jakim są one obciążone lub jak wpływają na wynik [6]. Najczęściej bowiem stosowano wskazywanie postrzeganego kierunku ruchu dźwięku palcem, ręką, nosem [6]. Następnie zaczęto wprowadzać różnego rodzaju zmechanizowane lub skomputeryzowane interfejsy [7].

Warto podkreślić, iż badanie MAA stanowi eksperyment różnicowy, a badanie lokalizacji wykorzystuje metodę limitów [1, 6]. Najwyższą precyzję osiąga się dla kątów zlokalizowanych na przedniej

półkuli względem słuchacza. Istotne jest też zastosowanie odpowiednich (czyli szerokopasmowych, szumowych) próbek dźwięku [8].

### 14.2.3. Badanie właściwe

Metody stosowane przy wyznaczaniu parametru MAA przy użyciu fizycznych źródeł dźwięku posłużyły jako bezpośrednie odniesienie do przeprowadzenia analogicznych testów na ambisonicznym systemie odtwarzania. Pozorne źródło dźwięku zakodowane do formatu ambisonicznego przy zastosowaniu narzędzi ambisonicznych IEM Suite [9, 10], a następnie odtworzone na wielokanałowym systemie głośnikowym, z zastosowaniem trzeciego rzędu ambisonii. Otrzymane wyniki zestawiono z wynikami oryginalnego eksperymentu Mills'a [2]. Podczas samego badania pojawiło się także wiele pomysłów na optymalizację interfejsu testu, metody badawczej oraz na zbadanie wpływu zmiennych, takich jak umiejscowienie i ilość głośników czy rzędu ambisonii.

Testy psychoakustyczne przeprowadzane w kontrolowanym otoczeniu z wykorzystaniem odpowiednich próbek, np. szumowych, szumowych filtrowanych lub części mowy, pozwalają na określenie relacji pomiędzy reakcją słuchacza, a intensywnością danego bodźca. W ramach tych eksperymentów, w zależności od badanego parametru, wykorzystuje się metody polegające na detekcji lub dyskryminacji. Zgromadzone wyniki pozwalają na obliczenie funkcji psychometrycznych, kluczowych do opisu zjawisk z zakresu psychofizyki i neurologii poznawczej [4]. W niniejszej pracy, do obliczenia funkcji psychometrycznych dla uzyskania wyników doświadczenia 2AFC MAA zastosowano zaprogramowany w Matlabie skrypt *psignifit 4* [11]. Bazuje on na modelu beta-binomialnym, co pozwala uzyskać wiarygodne wyniki oszacowań nawet dla rozproszonych danych. W celu analizy i interpretacji rezultatów testów psychoakustycznych o ograniczonym zbiorze dostępnych danych wykorzystano algorytm oparty na metodzie bayesowskiej z uwzględnieniem próby Bernoulliego [11].

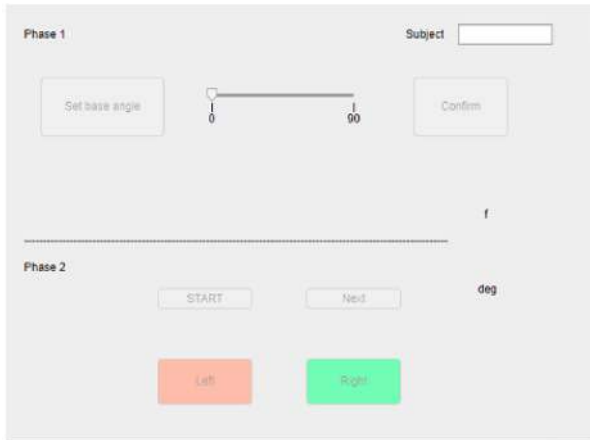
## 14.3. Eksperyment

### 14.3.1. Stanowisko testowe

Stanowisko testowe znajdowało się w średniej wielkości pomieszczeniu o ograniczonych odbiciach dźwięku, a czas pogłosu RT60 wynosił ok. 0,15 s. Zastosowany system odtwarzania dźwięku składał się z zestawu ośmiu głośników Genelec 6010 ustawionych na obwodzie okręgu o średnicy 3 m, na wysokości 1,2 m, odpowiadającej poziomowi uszu słuchacza. System odtwarzania skalibrowany został za pomocą miernika poziomu dźwięku SVANTEK dla poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku SPL (ang. *sound pressure level*) do wartości 61 dB (A) białego szumu. Poziom tła akustycznego pomieszczenia wyniósł 22 dB (A), wobec czego stosunek sygnału do szumu (SNR) był równy 41 dB.

### 14.3.2. Przebieg eksperymentu z zastosowaniem tonów prostych

Zarówno eksperyment referencyjny Mills'a [2], jak również ten przeprowadzony w ramach pracy zostały wykonane według poniższego planu: w teście referencyjnym [2] głowa słuchacza została unieruchomiona, a słuchacz odcięty został od wrażeń wzrokowych przy pomocy opaski. Zakrywanie oczu słuchacza w eksperymencie, w którym zastosowano źródła pozorne nie było konieczne, ze względu na brak wizualnych wskazówek. By zagwarantować właściwe ustawienie głowy, słuchacz został poproszony o skupianie wzroku na interfejsie aplikacji (rys. 14.1), która znajdowała się dokładnie na osi środkowej systemu odtwarzania. Za pozycje referencyjne służyły punkty: 0°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°. Dla każdej z tych pozycji odtworzono próbki dźwięku (tony w zakresie od 250 Hz do 10kHz) w losowej kolejności.



**Rys. 14.1.** Interfejs graficzny aplikacji wykorzystanej do przeprowadzenia eksperymentu

Test ten składał się z dwóch etapów. W pierwszym z nich słuchacz wyznaczał kąt bazowy, czyli ręcznie ustalał taką wartość MAA dla której był w stanie bez trudu określić, w którą stronę zmieniło się położenie dwóch następujących po sobie próbek dźwięków względem pozycji referencyjnej. Zadanie to było powtarzane dwukrotnie – za pierwszym razem bodźce były w tym samym miejscu, a słuchacz zwiększał wartość MAA. Za drugim, odległość kątowa pomiędzy dźwiękami wynosiła  $90^\circ$ , a słuchacz zmniejszał wartość MAA. Etap ten powtarzany był dla każdej częstotliwości. Po ustaleniu kąta bazowego (stanowiącego średnią arytmetyczną obydwu powtórzeń), rozpoczynano drugą część testu. Dla kolejnej częstotliwości, odtwarzano pierwszą próbkę testową z *pozycji referencyjnej*, a kolejna próbka była przesunięta względem pierwszej o wyznaczony w pierwszej fazie kąt bazowy w losową stronę (w prawo lub w lewo względem słuchacza, a zadaniem słuchacza było określenie tego kierunku). Przesunięcie było następnie zmniejszane o 75%, 50% i 25%, po czym go ponownie zwiększano o te same wielkości, kończąc na *kącie bazowym*. W eksperymencie [2] obliczono minimalny kąt słyszalności jako połowę różnicy między punktami wyznaczającymi 25% a 75% na osi rzędnych funkcji psychometrycznej.

Dla każdego ze słuchaczy eksperyment składał się z 624 powtórzeń (13 częstotliwości x 6 kątów referencyjnych x 8 ułamków wartości kąta bazowego). Test trwał około 45 minut, nie licząc 10-minutowej przerwy w połowie jego trwania. Testowi poddanych zostało siedmioro słuchaczy, których doświadczenie klasyfikowało się w zakresie od wysokiego do eksperckiego (inżynierowie dźwięku, doktoranci studiów z inżynierii akustycznej, nauczyciele akademicy z zakresu reżyserii dźwięku). Za pomocą skryptu zaprogramowanego w środowisku Matlab przeanalizowano wyniki, wyznaczając krzywe psychometryczne [11]. Aby je wyliczyć, dla powyżej omówionego eksperymentu użyto następujących parametrów: funkcji dopasowania: logistycznej i Weibulla, oraz progno rozpoznawalności na poziomie 75%.

### 14.3.3. Eksperyment z zastosowaniem szumu gaussowskiego

Badanie [2] jest istotne ze względu na zdefiniowanie parametru MAA oraz opisanie pierwszej próby jego wyznaczenia. W kolejnych eksperymentach wykorzystywano bardziej zaawansowane metody oraz przyjmowano bodziec w postaci szumu lub części mowy, a nie tonów prostych. Na przykład w późniejszych pracach, m.in. Perrot [12] posłużył się metodą adaptacyjną 2AFC “trzy w górę, jeden w dół” wykorzystując przy tym próbki z szumem różowym w zakresie 500 Hz – 8000 Hz. Zwrócił on również uwagę na to, że zdarzenia akustyczne zachodzące stricte w płaszczyźnie horzontalnej zdarzają



się w życiu codziennym niezwykle rzadko, ponieważ te wymagają sterylnej środowiska z rozproszeniem bliskim zeru, a także całkowitego ograniczenia ruchu głowy [12]. W [13] analizie potencjalnych zmiennych wynioskowano, że:

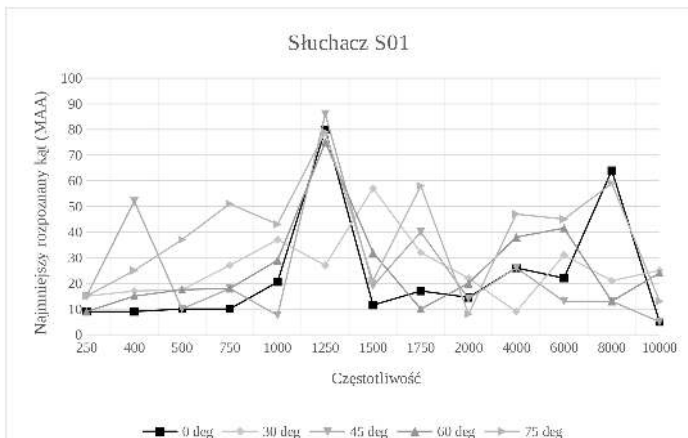
- istnieje silna zależność między dokładnością a złożonością bodźca akustycznego;
- tony proste nie są lokalizowane miarodajnie [12]– [14], zamiast nich wykorzystywane są próbki oparte na szumie.

Warto również wspomnieć, że w opisywanym tutaj eksperymencie długość trwania próbki szumowej została przyjęta zgodnie z dostępnymi badaniami i wyniosła 500 ms. Zależność od długości trwania próbki staje się znacząca poniżej 100 ms i została gruntownie przebadana przez [17]. Choć [18] nie udało się wykazać jednoznacznej zależności od długości, m.in. Strybel [17] wykazał jej wpływ na uzyskiwane rezultaty. Warto również zaznaczyć, że wiele czynników może decydować o zmienności wyników, jak np. dobór wdrożonej metody czy szerokość pasma częstotliwości próbki. Przyczynia się to do trudności w uzyskaniu obiektywnego MAA. Niemniej udało się ustalić [19], że w celu uzyskania rzetelnych rezultatów należy zastosować próbki o czasie trwania przekraczającym 80 ms.

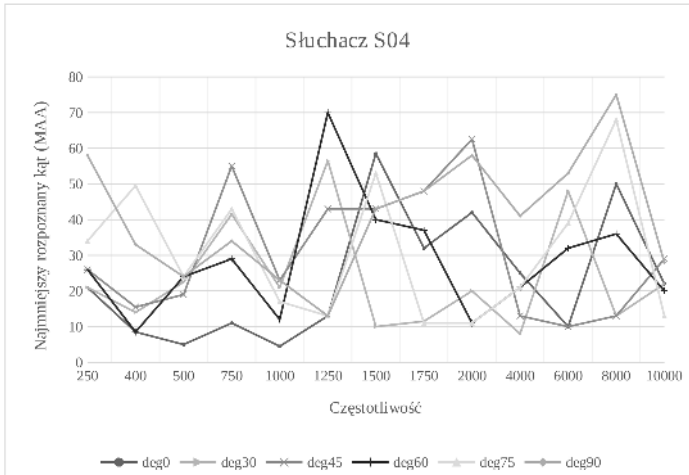
Badanie odbyło się z wykorzystaniem tego samego systemu odtwarzania i tej samej aplikacji. W samej metodzie i skrypcie programu dokonano zmiany ilości powtórzeń dla każdej *pozycji referencyjnej*, próbka odtwarzana była w sumie czterokrotnie dla każdego ułamka kąta bazowego, w sumie 4 wartości kąta bazowego  $\times$  4 powtórzenia  $\times$  6 pozycji = 96 próbek. W tym przypadku test trwał nie więcej niż 15 minut. Przebadano sześcioro słuchaczy. Badany w analogiczny jak w przypadku tonów prostych sposób utrzymywał głowę w osi środkowej patrząc na interfejs, udział odpowiedzi czy próbka druga jest percepowana z prawej lub lewej strony względem próbki pierwszej.

## 14.4. Omówienie wyników i dyskusja

Na rysunkach 14.2 i 14.3 zaprezentowane zostały wyniki uzyskane w eksperymencie z wykorzystaniem tonów prostych.



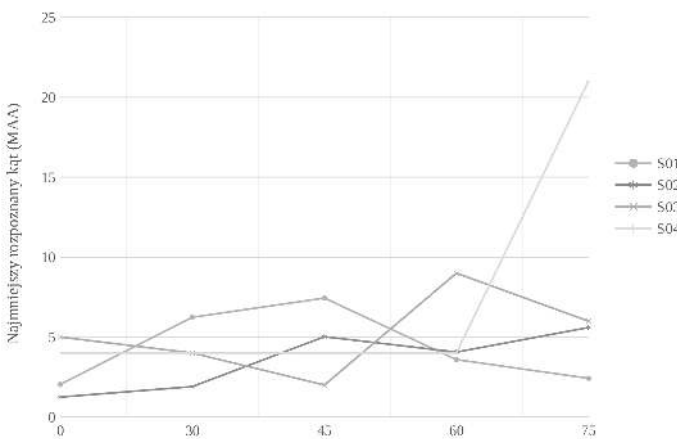
**Rys. 14.2.** Wykres przedstawia zależność najmniejszego rozpoznawanego kąta od częstotliwości dla pozycji referencyjnych dla słuchacza S01. Pozycja  $90^\circ$  została odrzucona ze względu na zbyt duży kąt bazowy



**Rys. 14.3.** Wykres przedstawia zależność najmniejszego rozpoznawanego kąta od częstotliwości dla wszystkich pozycji referencyjnych dla słuchacza S04

Uzyskane wartości MAA przy zastosowaniu źródła pozornego w systemie ambisonicznym są znacznie wyższe niż te zanotowane przez Mills'a (przy użyciu fizycznego źródła dźwięku), co wskazuje na mniejszą rozdzielczość przestrzenną. W niektórych przypadkach kąt bazowy określony w pierwszej fazie dla pozycji referencyjnej 90° przez słuchacza był zbyt duży i z tego powodu nie pozwalał na wyznaczenie MAA. Poniżej zaprezentowano dwa przykładowe przypadki: dla słuchacza S01 (rys. 14.2), dla którego dla pozycji referencyjnej 90° kąt bazowy wyniósł 72°, nie pozwalając na określenie MAA oraz dla słuchacza S04 (rys. 14.3), dla którego tę pozycję udało się obliczyć.

Wyniki otrzymane w eksperymencie z wykorzystaniem szumu gaussowskiego są znacznie niższe niż w przypadku tonów prostych (rys. 14.4), co pokrywa się z oczekiwaniami [14]– [16].



**Rys. 14.4.** Wykres przedstawia zależność najmniejszego rozpoznawanego kąta od pozycji referencyjnych dla słuchaczy S01–04 w teście z próbką szumową

Oprócz bardziej miarodajnego bodźca, jakim jest sygnał szerokopasmowy, test trwał znacznie krócej co przyczyniło się do mniejszego zmniejszenia osób badanych.

Aby zbadać to, które z czynników wpłynęły na różnice pomiędzy otrzymanymi wynikami a rezultatami z eksperymentu referencyjnego [2], planowany jest szereg kolejnych testów, m. in. optymalizacja metody eksperymentu, która w obecnej formie wydaje się zbyt męcząca dla słuchacza ze względu na zbyt długi czas trwania badania (około 50 min z przerwą). Planowane jest również przeprowadzenie eksperymentów dla wyższych rzędów ambisonii, z zastosowaniem różnych algorytmów kodujących oraz inną konfiguracją głośników.

## Bibliografia

- [1] E. B. Goldstein (Ed.), *Blackwell handbook of sensation and perception*, John Wiley & Sons, 2008.
- [2] A. W. Mills, *On the minimum audible angle*, The Journal of the Acoustical Society of America, 30 (4), 237–246, 1958.
- [3] E. Schroger, *A neural mechanism for involuntary attention shifts to changes in auditory stimulation*, Journal of Cognitive Neuroscience, 8 (6), 527–539, 1996.
- [4] L. B. Shestopalova i in., *Discrimination of auditory motion patterns: the mismatch negativity study*, Neuropsychologia, 50 (12), 2720–2729, 2012.
- [5] H. Wagner, D. Kautz, I. Poganiatz, *Principles of acoustic motion detection in animals and man*, Trends in neurosciences, 20 (12), 583–588, 1997.
- [6] S. Carlile, J. Leung, *The perception of auditory motion*, Trends in hearing, 20, 2016.
- [7] P. Power, C. B. Dunn, J. Hirst, *Localisation of elevation sources in higher-order ambisonics*, BBC Research & Development White Paper, WHP 261, 2013.
- [8] B. C. J. Moore, *An introduction to the psychology of hearing*, Brill, 2012.
- [9] IEM plugins official website: <https://plugins.iem.at/docs/plugin-descriptions>
- [10] F. Zotter, M. Frank, *Ambisonics: A practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement and virtual reality*, Springer Nature, 2019.
- [11] H. H. Schutt i in., *Painfree and accurate Bayesian estimation of psychometric functions for (potentially) overdispersed data*, Vision research, 122, 105–123, 2016.
- [12] D. R. Perrott, K. Saberi, *Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth*, The Journal of the Acoustical Society of America, 87 (4), 1728–1731, 1990.
- [13] R. A. Butler, S. K. Roffler, R. F. Naunton, *The role of stimulus frequency in the localization of sound in space*, Journal of Auditory Research, 7 (2), 169–180, 1967.
- [14] C. C. Pratt, *The spatial character of high and low tones*, Journal of Experimental Psychology, 13 (3), 278, 1930.
- [15] O. C. Trimble, *Localization of sound in the anterior–posterior and vertical dimensions of auditory spaces*, British Journal of Psychology, 24 (3), 320, 1934.
- [16] A. Bolle, A. LoSurdo, G. Zanutelli, *Localizzazione in altezza mediante un orecchio artificiale*, Ricerca sci. ricost, 18, 1564, 1948.
- [17] T. Z. Strybel, C. L. Manllgas, D. R. Perrott, *Minimum audible movement angle as a function of the azimuth and elevation of the source*, Human factors, 34 (3), 267–275, 1992.
- [18] J. M. Figueiredo, D. Wesley Grantham, *Minimum audible angle and minimum audible movement angle in the median sagittal plane as a function of stimulus spectrum and reference elevation*, Diss. Acoustical Society of America, 1997.
- [19] O. Hofman, M. Paul, A. J. Van Opstal, *Spectro–temporal factors in two–dimensional human sound localization*, The Journal of the Acoustical Society of America, 103 (5), 2634–2648, 1998.



# Indeks autorów

## **B**

Batko Wojciech, 9  
Bismor Dariusz, 47  
Bolejko Romuald, 57  
Brachmański Stefan, 121

## **D**

Dobrucki Andrzej, 121  
Dziechciński Paweł, 57, 99

## **F**

Falkowski-Gilski Przemysław, 111, 121

## **K**

Kin Maurycy, 121  
Kociński Jędrzej, 129  
Kompąła Janusz, 25  
Kozłowski Emil, 79

## **Ł**

Łubniewski Zbigniew, 111

## **M**

Małecki Paweł, 139  
Mikulski Witold, 15  
Miterańska Magdalena, 25  
Młyński Rafał, 79

## **P**

Pastusiak Anna, 129  
Plaskota Przemysław, 57

## **R**

Radosz Jan, 35, 89  
Rudno-Rudzińska Barbara, 57

## **S**

Sochaczewska Katarzyna, 139

## **Ś**

Świerkoska Anna, 67

## **W**

Warzybok Anna, 129  
Wiciak Jerzy, 9, 139



## Organizatorzy



Polskie Towarzystwo Akustyczne



Polska Akademia Nauk



International Commission for Acoustics



Acoustical Society of America

Konferencja pod Honorowym Patronatem Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.



## Sponsorzy



Wydarzenie jest organizowane w ramach obchodów International Year of Sound

