

Oddział Górnośląski Polskiego Towarzystwa Akustycznego
Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk

***Materiały
XLVIII i XLIX Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska
i Wibroakustyki***



**Gliwice-Szczyrk
2020-02-24 – 28, 2022-02-28 – 03-04**

**Oddział Górnośląski
Polskiego Towarzystwa Akustycznego
Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk**

**Materiały XLVIII Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska
i Wibroakustyki**

**Gliwice-Szczyrk
2020-02-24 ÷ 28**

Organizatorzy konferencji:

Oddział Górnośląski Polskiego Towarzystwa Akustycznego
Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk

Redakcja Materiałów Szkoły: dr inż. Roman Bukowski

Artykuły wydrukowano na podstawie maszynopisów dostarczonych przez autorów
bez wprowadzania zmian w ich treść.

Wydawca:

Polskie Towarzystwo Akustyczne – Oddział Górnośląski
ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
<https://ogpta.pl/index.php/sz-asiw2>, <https://ogpta.pl/index.php/en/wseav>

ISBN: 978-83-957014-0-5

Drukarnia: "Cyfrodruck", ul. Roosevelta 33, 41-800 Zabrze

Komitety Programowy
XLVIII Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk, 2020-02-24 ÷ 28

prof. dr hab. inż. Wojciech BATKO (AGH)

dr hab. inż. Grażyna GRELOWSKA (PGd)

prof. zw. dr hab. Edward HOJAN (UAM)

prof. dr hab. inż. Jan KAŻMIERCZAK (PŚI)

dr hab. Janusz KOMPALA(GIG)

prof. dr hab. inż. Eugeniusz KOZACZKA (PGd)

prof. dr hab. inż. Marek PAWEŁCZYK (PŚI)

dr hab. inż. Dariusz PLEBAN (CIOP – PIB)

dr inż. Krzysztof RUDNO-RUDZIŃSKI (PW_r)

dr hab. Ewa SKRODZKA (UAM)

prof. dr hab. inż. Stefan WEYNA (ZUT)

prof. dr hab. inż. Jerzy WICIAK (AGH)

Komitety Organizacyjny
XLVIII Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk, 2020-02-24 – 28

Koordinator Szkół Zimowych, Przewodniczący Oddziału Górnośląskiego PTA

dr hab. inż. Franciszek WITOS

Skarbnik Szkół Zimowych, Skarbnik Oddziału Górnośląskiego PTA

dr inż. Aneta OLSZEWSKA

Sekretarz Szkół Zimowych, Sekretarz Oddziału Górnośląskiego PTA

dr hab. inż. Dariusz BISMOR

Chairman Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki

dr inż. Roman BUKOWSKI

XLVIII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki

Szczyrk, 2020-02-24 – 28

SPIS TREŚCI

<i>Autor(rzy)/Tytuł</i>	<i>Str.</i>
1. MIKULSKI Witold	7
<i>Wpływ tła akustycznego na promień rozproszenia w pomieszczeniach biurowych open space</i>	
Dodatek 1 – Szkolenie firmy SVANTEK	17
Dodatek 2 – Z historii – XLVII SZ AŚiW	23
Dodatek 3 – Program XLVIII SZ AŚiW	31
Materiały XLIX Szkoły Zimowej AŚiW	37

WPLYW TŁA AKUSTYCZNEGO NA PROMIEŃ ROZPROSZENIA W POMIESZCZENIACH BIUROWYCH OPEN SPACE

Witold MIKULSKI

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

e-mail: wimik@ciop.pl

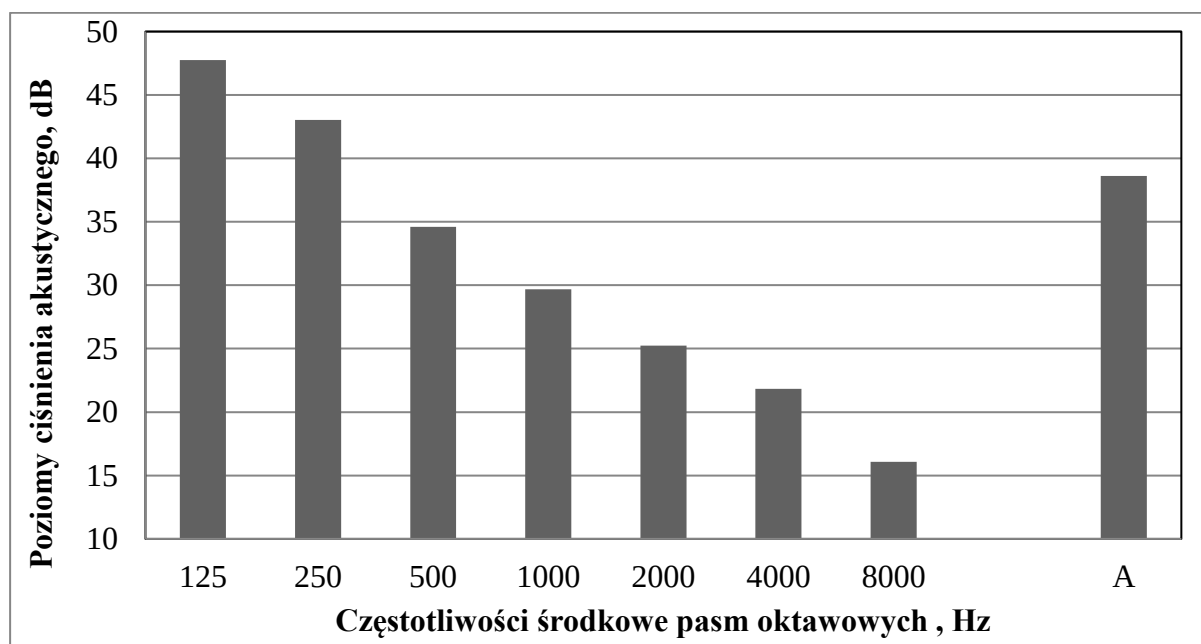
1. WSTĘP

Jednym z czynników wpływających na uciążliwość pracy w pomieszczeniach biurowych open space są dźwięki rozmów pracowników. Uciążliwość tych dźwięków jest przede wszystkim spowodowana tym, że niosą one informację powodującą dekoncentrację pracowników. Można tutaj wyróżnić trzy przypadki: I – hałas tylko od tła akustycznego (od wyposażenia technicznego budynku oraz hałasu przenikającego do pomieszczenia z zewnątrz), II – hałas wypadkowy typu I i od rozmów pracowników, których nie można zrozumieć (w większości przypadków od rozmów prowadzonych przez wielu rozmówców znajdujących się w większej odległości od obserwatora – gwar), III – wypadkowy hałas typu II i od rozmów, które można zrozumieć (zwykle pochodzący od rozmówców znajdujących się w bliskiej odległości od obserwatora). Pierwsze dwa przypadki można traktować, jako tło akustyczne odpowiednio typu I i II. W artykule przedstawiono wyniki badań obliczeniowych trzech parametrów charakteryzujących środowisko akustyczne (w tym właściwości akustyczne) pomieszczenia biurowego open space. Parametrami tymi są promień (odległość) rozproszenia r_D , promień (odległość) prywatności r_P oraz wskaźnik transmisji mowy na najbliższym stanowisku pracy w stosunku do stanowiska pracy z wzorcowym źródłem mowy (tj. w rozpatrywanym pomieszczeniu w odległości 2m od źródła) STI_{near} . Badania przeprowadzono na przykładzie typowego pomieszczenia, uwzględniając tła akustyczne typu I i II.

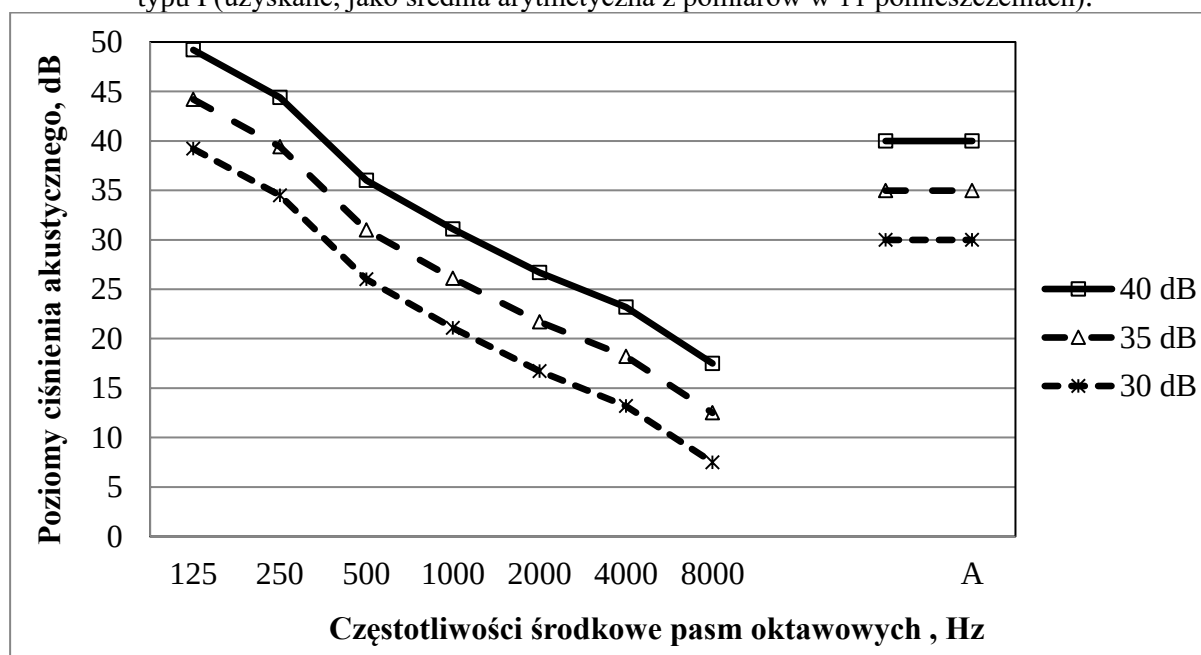
2. ZAKRES BADAŃ, METODA BADAŃ I KRYTERIA OCENY

Badania dotyczą określania metodami obliczeniowymi wpływu tła akustycznego na warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space określane parametrami wg PN-EN ISO 3382-3:2012 (tj. promieniem rozproszenia, promieniem prywatności, poziomem dźwięku A mowy w odległości 4m, spadkiem poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości oraz wskaźnikiem transmisji mowy STI_{near}). W badaniach zostaną uwzględnione dwa typy widm dźwięku. I – widmo typowego hałasu tła akustycznego bez obecności ludzi (widmo określone z pomiarów wcześniejszych zespołu autora w 11 pomieszczeniach

biurowych open space; Rys. 1) odpowiednio skorygowane, aby poziom dźwięku A wynosił 30, 35 i 40 dB (Rys. 2; największą wartość 40 dB przyjęto jako wartość dopuszczalną hałasu tła w pomieszczeniach biurowych wg PN-N-02151-02).



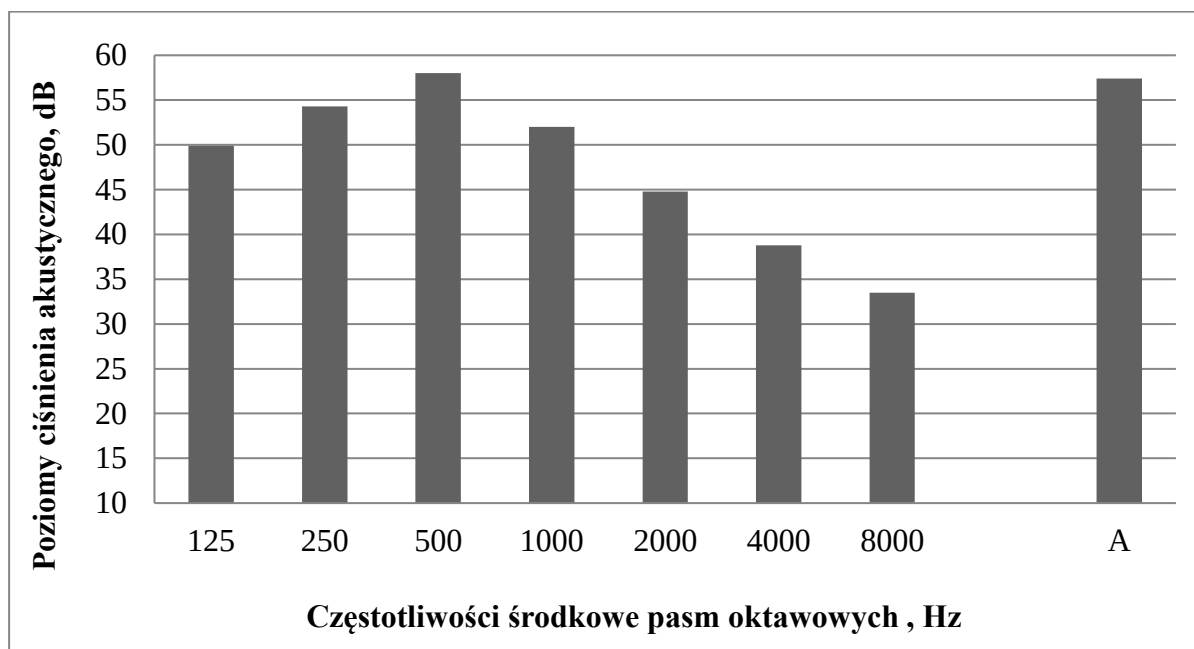
Rys. 1. Poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości tła akustycznego typu I (uzyskane, jako średnia arytmetyczna z pomiarów w 11 pomieszczeniach).



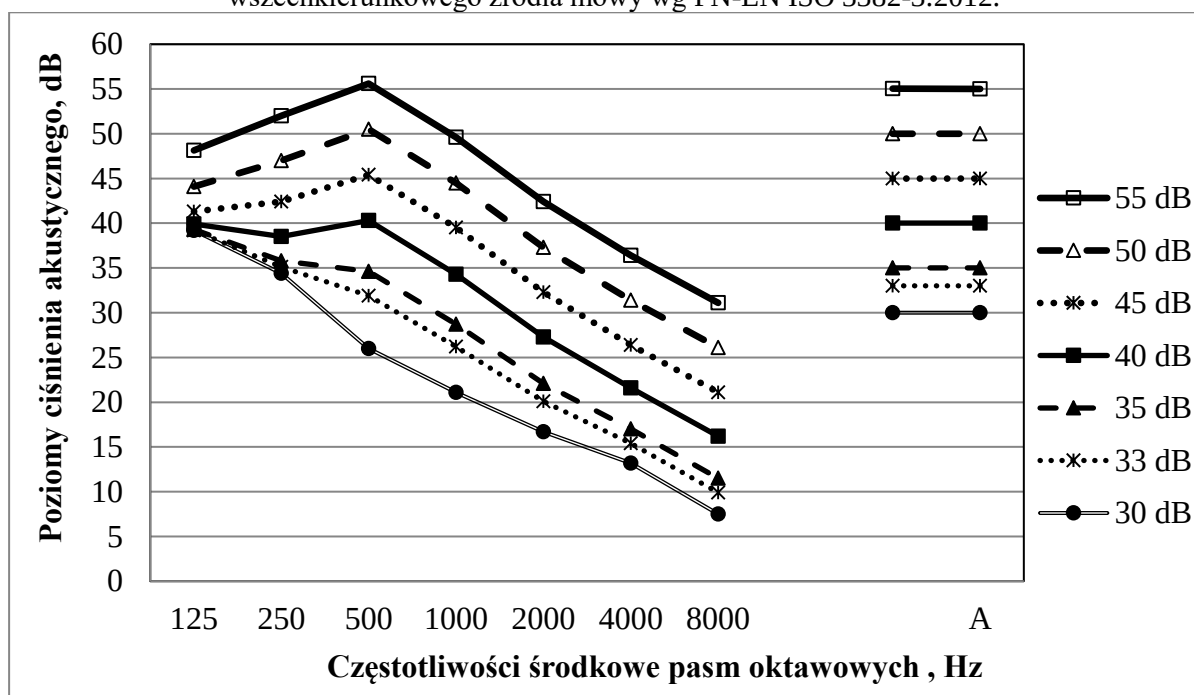
Rys. 2. Poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości tła akustycznego typu I, o poziomach dźwięku A: 30, 35 i 40 dB.

II – widmo hałasu tła akustycznego od dwóch składowych: pierwsza – widma akustycznego typu I o poziomie dźwięku 30 dB (Rys. 2); druga – widmo akustyczne dźwięków mowy (wg PN-EN ISO 3382-3:2012; Rys. 3) i takim poziomem dźwięku A, aby wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego typu II był równy: 30, 35, 40, 45, 50 i 55 dB (Rys. 4;

przyjęto największą wartość 55 dB ponieważ ta wartość jest wartością dopuszczalną hałasu na stanowiskach pracy biurowej od wszystkich źródeł hałasu łącznie wg PN-N-01307:1994).



Rys. 3. Poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości wszechkierunkowego źródła mowy wg PN-EN ISO 3382-3:2012.



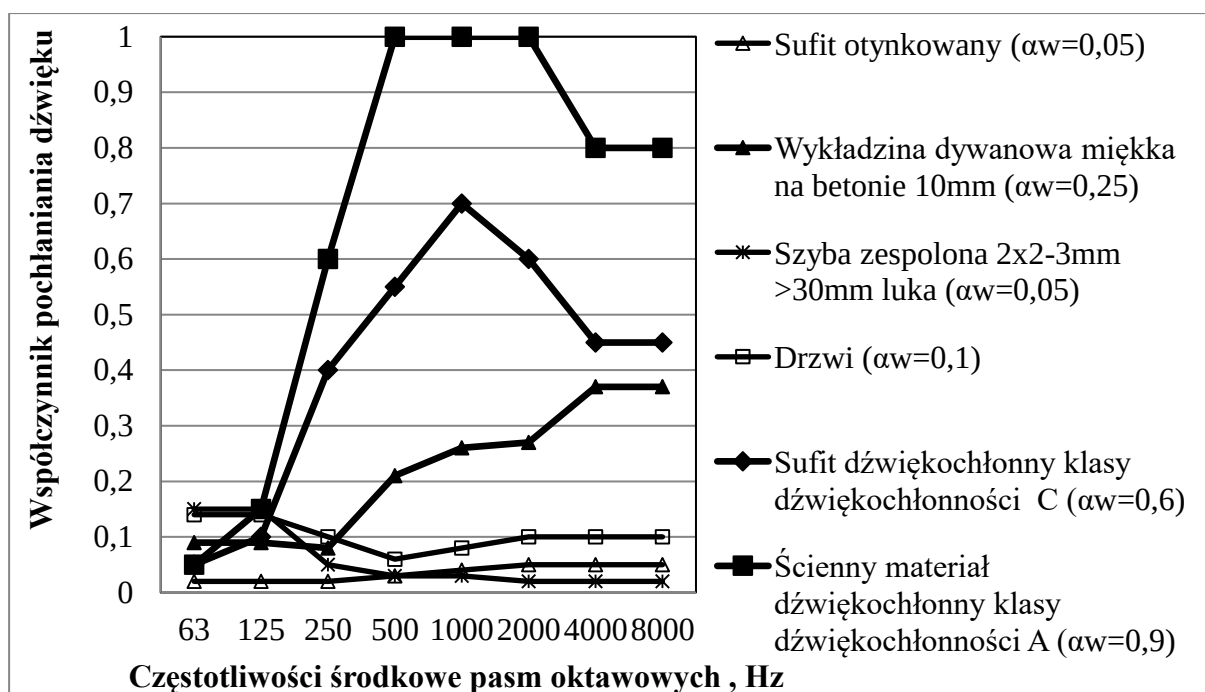
Rys. 4. Poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości tła akustycznego typu II, o poziomach dźwięku A: 30, 35, 40, 45, 50 i 55 dB.

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

Kryterium oceny właściwości akustycznych środowiska akustycznego (w tym właściwości akustycznych pomieszczenia), dla przyjętego tła akustycznego, będzie uwzględniało parametry określone w PN-EN ISO 3382-3:2012, w szczególności: promień (odległość) rozproszenia r_D (zalecana wartość dla tzw. dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia $r_D \leq 5$ m; typowe wartości 5-10 m), promień (odległość) prywatności r_P oraz wskaźnik transmisji mowy na najbliższym w stosunku pracy do wzorcowego źródła mowy (tj. w odległości 2 m od źródła) STI_{near} . Na pozostałe parametry wg PN-EN ISO 3382-3:2012 (spadek poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości $D_{2,S}$ i poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m}$) oraz wg PN-B-02151-4:2015 (chłonność akustyczną pomieszczenia lub czas pogłosu pomieszczenia), poziom tła nie wpływa.

3. OPIS POMIESZCZENIA, W KTÓRYM PRZEPROWADZONO BADANIA

Wymiary pomieszczenia 22x10x3,5 m, kubatura 770 m³, pole powierzchni rzutu pomieszczenia (podłogi) 220 m². W pomieszczeniu zainstalowany był sufit dźwiękochłonny i materiał dźwiękochłonny na czterech ścianach oraz 55 ekranów akustycznych o wysokości 1,7 m okalających z trzech stron 55 stanowisk pracy. Współczynniki pochłaniania dźwięku podano na Rys. 5.

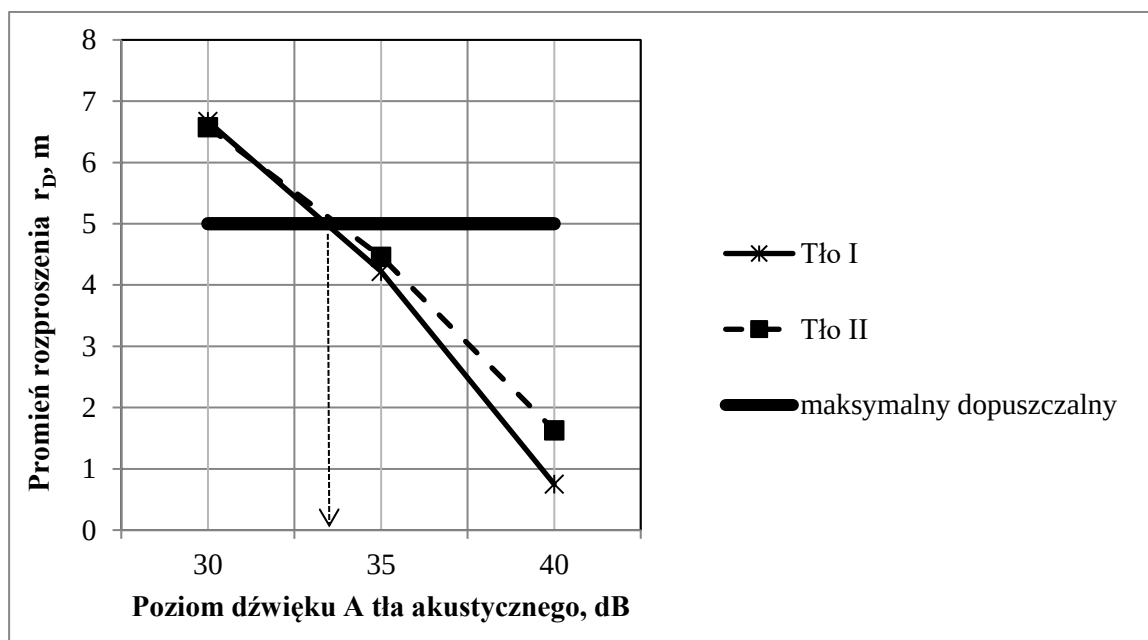


Rys. 5. Współczynniki pochłaniania dźwięku materiałów uwzględnianych w obliczeniach (wg danych z PN-B-02151-4:2015 oraz bazy danych programu ODEON).

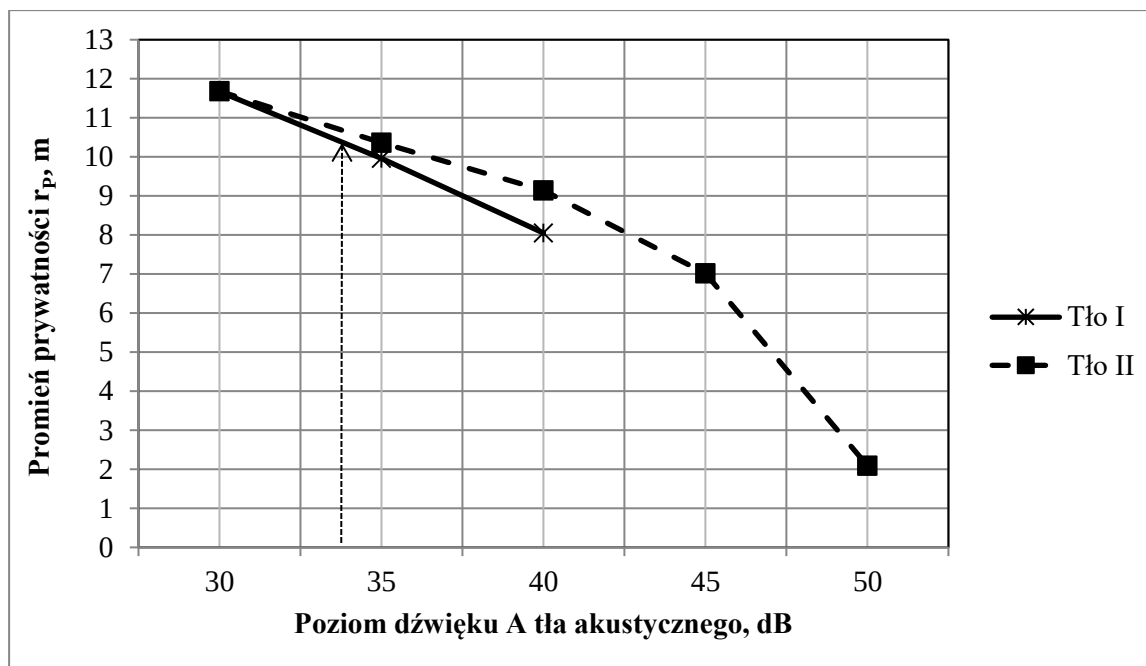
Czas pogłosu pomieszczenia wynosił 0,28, 0,29, 0,37 s, a chłonność akustyczna pomieszczenia odniesiona do 1 m^2 powierzchni podłogi wynosiła 1,76, 1,69 i $1,3 \text{ m}^2$ (odpowiednio dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz), poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m}$ wynosił 45,6 dB, a spadek poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości $D_{2,S}$ wynosił 5,7 dB. Dla widma typu I o poziomie dźwięku A tła akustycznego 30 dB (Rys. 2), promień rozproszenia r_D , wynosił 6,7 m, a promień prywatności r_P , wynosił 11,7 m,

4. WYNIKI BADAŃ

Na Rys. 6 podano wyniki obliczeń promienia rozproszenia r_D dla widm tła akustycznego typu I i II o poziomach dźwięku A: 30, 35, 40 dB. Nie podano wyników (choć wyżej zadeklarowano) tego parametru dla widma typu II i poziomów dźwięku 45, 50 i 55 dB. Przyczyną tego jest niemożliwość interpretacji fizycznej obliczonych wartości tego parametru, ze względu na bardzo małe ich wartości. Na Rys. 8 można zauważyć, że dla tego typu widma (II) i tych wartości poziomów dźwięku A, wartość wskaźnika transmisji mowy na najbliższym stanowisku pracy tj. STI_{near} wynosi odpowiednio 0,41, 0,26 i 0,11 tzn. że $r_D < 2 \text{ m}$ i jest spełniony warunek $r_D \leq 5 \text{ m}$ (w szczególności $r_D \ll 5 \text{ m}$). Wynika z tego, że w przypadku, gdy w rozpatrywanym pomieszczeniu występuje hałas tła akustycznego typu I lub typu II o poziomie dźwięku A większym niż ok. 33 dB, warunki akustyczne określone promieniem rozproszenia r_D należy w tym pomieszczeniu uznać za dobre.



Rys. 6. Wyniki obliczeń promienia rozproszenia r_D dla tła akustycznego typu I i II, o poziomach dźwięku A: 30, 35 i 40 dB.



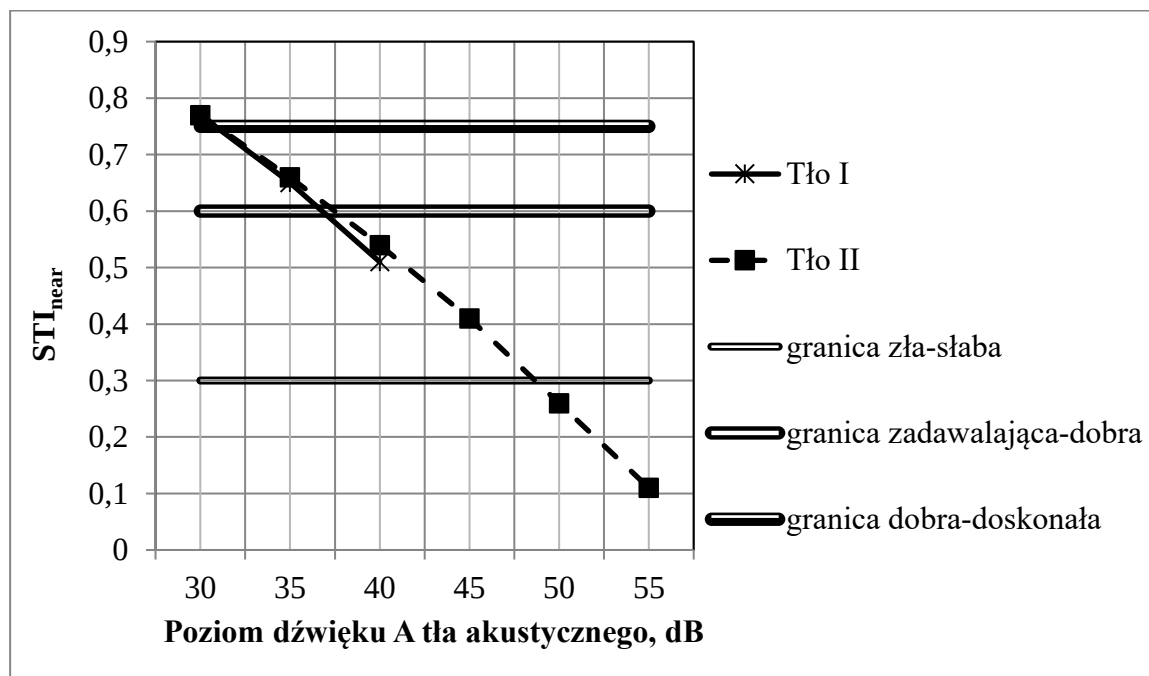
Rys. 7. Wyniki obliczeń promienia prywatności r_p dla tła akustycznego typu I i II, o poziomach dźwięku A: 30, 35 i 40 dB.

Na Rys. 7 podano wyniki obliczeń promienia prywatności r_p dla widma tła akustycznego typu I (o poziomach dźwięku A 30, 35 i 40 dB) oraz widma tła akustycznego typu II (o poziomach dźwięku A 30, 35, 40, 45 i 50 dB). Założono, że wyniki oceny warunków akustycznych w tym samym pomieszczeniu wg parametru promień rozproszenia i promień prywatności powinny być zbliżone. Wartość kryterialna (graniczna) dla promienia rozproszenia r_D (równa 5 m) występuje dla poziomu dźwięku A tła akustycznego ok. 33 dB (strzałka na Rys. 6), a tej wartości poziomu dźwięku A tła akustycznego odpowiada wartość promienia prywatności r_p ok. 10,5 m (strzałka na Rys. 7). Wynika z tego, że dla tego pomieszczenia, kryterium dla promienia prywatności powinno wynosić $r_p \leq 10,5$ m (tzn. wartości kryterialne spełniają warunek $r_p \approx 2,1 \cdot r_D$).

Na Rys. 8 podano wartość wskaźnika transmisji mowy na najbliższym (sąsiednim) stanowisku pracy (w odległości 2 m od źródła mowy) STI_{near} . Można zauważyć, że dla poziomu dźwięku A tła akustycznego równego 30 dB (zarówno tła akustycznego typu I jak i II), wartość wskaźnika transmisji mowy STI_{near} wynosi 0,77 (tzn. że zrozumiałość mowy między stanowiskami, wg PN-EN 60268-16:2011, jest doskonała – rozmowy na sąsiednich stanowiskach pracy będą bardzo przeszkadzały w pracy). Dla poziomów dźwięku A tła powyżej 37 dB, wartość wskaźnika transmisji mowy STI_{near} jest mniejsza od 0,6 (zrozumiałość mowy, wg PN-EN 60268-16:2011, poniżej dobrej – rozmowy sąsiadów będą w średnim stopniu przeszkadzały w pracy). Dla poziomów dźwięku A tła akustycznego powyżej 47 dB, wartość

wskaźnika transmisji mowy STI_{near} jest mniejsza od 0,3 (zrozumiałość mowy, wg PN-EN 60268-16:2011, zła – rozmowy sąsiadów nie będą zrozumiałe, nie będą przeszkadzały w pracy). Wynika z tego, że gwar rozmów w pomieszczeniu będzie w znacznym stopniu wpływał na zmniejszenie zrozumiałości mowy nawet na najbliższych stanowiskach pracy, co wprawdzie wpłynie na zwiększenie hałasu, ale przez zmniejszenie zrozumiałości treści słownych, poprzez wzrost koncentracji uwagi pracowników oraz zmniejszenie uciążliwości pracy, wpłynie pozytywnie na warunki pracy.

Z wszystkich trzech wykresów widać, że widmo typu I w porównaniu do widma typu II w większym (choć w niewielkim stopniu) wpływa na zmniejszenie zrozumiałości mowy, a więc wpływa pozytywnie na zmniejszenie uciążliwości pracy.



Rys. 8. Wyniki obliczeń wskaźnika transmisji mowy STI_{near} dla tła akustycznego typu I i II, o poziomach dźwięku A: 30, 35 i 40 dB.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały duży wpływ tła akustycznego na zmniejszenie zrozumiałości mowy, a więc poprawę warunków pracy w pomieszczeniu biurowym open space. Dwa rozpatrywane widma hałasu: pierwsze od wyposażenia technicznego budynku i hałasu docierającego z zewnątrz oraz drugie wypadkowego hałasu o dwóch składowych widma pierwszego i widma od rozmów, nie wykazują dużej różnicy w ocenie warunków akustycznych środowiska w rozpatrywanych pomieszczeniach. Poziomy dźwięku A tła

akustycznego powyżej 33 dB powodują uzyskanie w rozpatrywanym pomieszczeniu wartości promienia rozproszenia poniżej 5 m, co przyjmuje się, jako dobre właściwości akustyczne środowiska akustycznego do pracy biurowej open space. W rozpatrywanym przykładzie, dla uzyskania zbliżonej oceny właściwości akustycznych rozpatrywanych pomieszczeń parametrami promień rozproszenia i promień prywatności, należy przyjąć, że wartość promienia prywatności powinna być ok. 2,1 razy większa tj. powinna wynosić ok. 10,5 m.

Przeprowadzone badania potwierdzają tezę o dużym wpływie poziomu dźwięku A tła akustycznego na wartości promienia rozproszenia i promienia prywatności. Ponieważ są one parametrami kryterialnymi stosowanymi w ocenie pomieszczeń biurowych open space, to wartości poziomu dźwięku A i charakter widma tła akustycznego (przyjętego w obliczeniach lub zmierzonego) będzie wpływać na tą ocenę. Aby uniknąć takiej niejednoznaczności, należy rozważyć przyjęcie w metodach oceny pomieszczeń biurowych open space tła standardowego (szczególnie na etapie projektowania akustycznego).

6. PODZIĘKOWANIE

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy. Autor dziękuje Panu Janowi Radoszowi, Panu Jerzemu Kozłowskiemu oraz Pani Izabeli Warmiak-Jakubowskiej za pomoc w wykonaniu pomiarów tła akustycznego, które zostały wykorzystane przy opracowaniu rys. 1.

6. LITERATURA

7. Kłosak A. K., Wytyczne do projektowania pomieszczeń zgodnie z nową normą o akustyce wewnątrz – PN-B-02151-4:2015-06, Materiały Budowlane, 2017, (8): 143-146. DOI: 10.15199/33.2017.08.43
8. Mikulski W., Adaptacja akustyczna pomieszczeń połączonych – badania symulacyjne – Materiały z Konferencji Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki, 11-30. Szczyrk, 26.02-2.03.2018.
9. Mikulski W., Badania obliczeniowe zrozumiałości mowy w pomieszczeniach biurowych open space, Medycyna Pracy, 2019, 70(3), 327-342. 10.13075/mp.5893.00726

10. Mikulski W., Projektowanie adaptacji akustycznej otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych. Część 1 – projektowanie podstawowe adaptacji akustycznej pomieszczenia z wykorzystaniem obliczeń wg PN-B-02151-4:2015, Materiały Budowlane, 2019, 564 (8), 16-20. DOI: 10.15199/33.2019.08.02
11. Mikulski W., Projektowanie adaptacji akustycznej otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych. Część 2 – Projektowanie dodatkowe, Materiały Budowlane, 2019, 565 (9): 82-85. DOI: 10.15199/33.2019.09.07
12. Nowicka E., Ocena właściwości akustycznych pomieszczeń typu open space, Materiały Budowlane, 2018, 552 (8), 16-18. DOI: 10.15199/33.2018.08.03
13. Nurzyński J., Warunki akustyczne w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych, Materiały Budowlane, 2018, 552 (8), 10-12. DOI: 10.15199/33.2018.08.02
14. ODEON Computer software, <https://odeon.dk/>. 28.01.2020
15. PN-N-01307:1994, Hałas. Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące wykonania pomiarów.
16. PN-B-02151-02:1987. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
17. PN-B-02151-4:2015. Akustyka budowlana Ochrona przed hałasem w budynkach Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach.
18. PN-EN ISO 3382-3:2012. Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 3: Pomieszczenia biurowe typu open space.
19. PN-EN 60268-16:2011. Urządzenia systemów elektroakustycznych – Część 16: Obiektywna ocena zrozumiałości mowy za pomocą wskaźnika transmisji mowy.

DODATEK 1

Szkolenie
przeprowadzane przez firmę SVANTEK
w ramach

XLVIII Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki



Górnośląski Oddział Polskiego
Towarzystwa Akustycznego oraz
firma SVANTEK

AKUSTYKA BUDOWLANA

Problematyka pomiaru
izolacyjności akustycznej
przegród budowlanych oraz
wskaźnika zrozumiałości
mowy

27 Lutego 2020 r.

**Hotel Meta
Skośna 4
Szczyrk**

Zgłoszenia przez email
biuro@svantek.pl
lub telefonicznie
+48 22 5188 325
+48 795 568 643

Akustyka Budowlana. Problematyka pomiaru izolacyjności akustycznej przegród budowlanych oraz wskaźnika zrozumiałości mowy.

Górnośląski Oddział Polskiego Towarzystwa Akustycznego oraz firma SVANTEK zapraszają na Państwa do udziału w seminarium dedykowanemu zagadnieniom akustyki budowlanej. Akustyka budynku to jeden z istotnych czynników wpływający na komfort mieszkania oraz korzystania z pomieszczeń użyteczności publicznej. Zwiększające się rynkowe zapotrzebowanie na pomiary z zakresu akustyki budowlanej to efekt rosnącej świadomości wykonawców i inwestorów.

Podczas spotkania omówimy aspekty teoretyczne związane pomiarami izolacyjności przegród oraz wskaźnika zrozumiałości mowy, zaprezentujemy aparaturę pomiarową oraz oprogramowanie z oferty SVANTEK. Dopełnieniem seminarium będą przykładowe pomiary związane z akustyką budowlaną, czyli pomiar tła akustycznego, czasu pogłosu oraz wskaźnika zrozumiałości mowy STIPA.

Miło jest nam poinformować, że gościem specjalnym podczas spotkania będzie dr inż. Paweł Dziechciński, Politechniki Wrocławskiej, który przedstawi problematykę pomiarów wskaźnika zrozumiałości mowy STIPA dla dźwiękowych systemów ostrzegawczych (DSO) oraz dla pomieszczeń użyteczności publicznej. Po części teoretycznej przejdziemy do części praktycznej związanej z pomiarami wskaźnika zrozumiałości mowy STIPA oraz pomiaru czasu pogłosu z wykorzystaniem miernika SVAN 979 oraz aplikacji BA Assistant.

Podczas spotkania będą mieli Państwo również okazję do zapoznania się z aktualną ofertą aparatury pomiarowej SVANTEK. Zachęcamy również do udziału w Szkole Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki. Podczas konferencji poruszane są ciekawe tematy z szeroko pojętej wibroakustyki.



Akustyka Budowlana. Problematyka pomiaru izolacyjności akustycznej przegród budowlanych oraz wskaźnika zrozumiałości mowy.

Program seminarium:

- 9:00 - 9:15 Rejestracja uczestników
9:15 - 9:30 Otwarcie seminarium
9:30 - 10:30 Pomiary izolacyjności akustycznej przegród budowlanych
- część teoretyczna
10:30 - 11:30 Pomiary izolacyjności akustycznej przegród budowlanych z użyciem dwóch mierników SVAN 979 i aplikacji Building Acoustics Assistant
11:30 - 11:45 Przerwa kawowa
11:45 - 13:30 Pomiary współczynnika zrozumiałości mowy STIPA, część teoretyczna
- dr inż. Paweł Dziechciński, Politechnika Wrocławska
13:30 - 14:30 Lunch
14:30 - 15:30 Pomiary współczynnika zrozumiałości mowy STIPA oraz czasu pogłosu przy użyciu SVAN 979 i aplikacji Building Acoustics Assistant
15:30 - 16:00 Podsumowanie i zakończenie seminarium

Zgłoszenia

przez email biuro@svantek.pl
lub telefonicznie +48 22 5188 325, +48 795 568 643

Szczegółowe informacje

Karol Sałagan, tel. +48 22 5188 325, +48 795 568 643

Koszt udziału

200 zł, zawiera przerwy kawowe i lunch
uczestnicy konferencji Szkoła Zimowa bez opłaty

Opłaty prosimy wnosić na konto
PKO BP SA: 53 1020 2401 0000 0502 0173 8087

Czekamy na Państwa zgłoszenia
do 21 lutego 2020 r.



DODATEK 2

Z historii

**XLVII Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk 2019**

foto – Roman Bukowski



**Przed otwarciem IOS i Szkół Zimowych
Szczyrk 2019**



**Organizatorzy otwierają sesję poświęconą jubileuszowi 90 urodzin
prof. Wiesława Wolińskiego**



Dostojny Jubilat, prof. Wiesław Woliński



**Gratulacje Jubilatowi składa
prof. Tomasz Woliński**



Jubileusz uświetnił występ kwartetu smyczkowego.



Sluchacze jednej z sesji XLVII SZ AŚiW



Dr inż. Witold Mikulski,
prelegent SZ AŚiW



Prof. Jacek Nurzyński,
prelegent SZ AŚiW



Dr hab. Dariusz Pleban przewodniczy
jednej z sesji SZ AŚiW



Dr inż. Leszek Morzyński
prelegent SZ AŚiW



W czasie szkolenia firmy SVANTEK



Mgr inż. Michał Stopa, prelegent szkolenia firmy SVANTEK
oraz Karol Sałagan, organizator szkolenia.

DODATEK 3

PROGRAM

**XLVIII SZKOŁY ZIMOWEJ
AKUSTYKI ŚRODOWISKA I WIBROAKUSTYKI**

SZCZYRK

2020-02-24 – 28

XLVIII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
SZCZYRK 2020-02-24 – 02-28

2020-02-24 – Poniedziałek

13:00	Obiad
14:30-14:35	Uroczyste otwarcie 15th IOS'2020, XLIX SZ AFiK oraz XLVIII SZ AŚiW
14:35-16:30	Sesja jubileuszowa
15:00-15:30	Plenary lecture: <i>Integrated photonics – yesterday, today and tomorrow</i> R. PIRAMIDOWICZ, S. STOPIŃSKI, A. PAŚNIKOWSKA, M. SŁOWIKOWSKI, A. KAŻMIERCZAK, A. JUSZA, K. ANDERS, W. PLESKACZ, P. SZCZEPAŃSKI
15:30-16:00	Plenary lecture: <i>Nanoparticles-doped photonic liquid crystal fibers for enhanced efficiency of electric field tunability</i> T. R. WOLIŃSKI, K. BEDNARSKA, D. BUDASZEWSKI, M. CHYCHŁOWSKI, P. LESIAK, B. BARTOSEWICZ, Z. JANKIEWICZ, R. DĄBROWSKI
16:00-16:30	Plenary lecture: <i>Nonlocal solitons</i> W. KRÓLIKOWSKI
16:30-17:00	Przerwa kawowa
17:00-18:30	<i>Czas wolny</i>
18:30-19:30	Kolacja
19:30-....	<i>Chwila z muzyką</i>

2020-02-25 – Wtorek	
8:00-9:00	Śniadanie
13:00	Obiad
14:20-14:30	Otwarcie XLVIII Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
14:30-16:30	Sesja konferencyjna: Ekologia akustyczna i krajobraz akustyczny <i>– przewodniczy prof. Jacek Nurzyński</i>
14:30-15:10	Janusz PIECHOWICZ, Jerzy WICIAK, Dorota CZOPEK, Paweł MAŁECKI <i>Dźwięki obszarów Spitsbergenu</i>
15:10-15:50	Dorota CZOPEK, Paweł MAŁECKI, Janusz PIECHOWICZ, Jerzy WICIAK <i>Wpływ ruchu turystycznego na krajobraz dźwiękowy wybranych miejsc na Spitsbergenie i w Tatrzańskim Parku Narodowym – studium przypadku</i>
15:50-16:30	Janusz KOMPAŁA <i>Czy potrafimy zarządzać hałasem w środowisku zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju?</i>
16:30-17:00	Przerwa kawowa
17:00-19:30	Czas wolny
19:30-...	Uroczysta kolacja – bankiet

2020-02-26 – Środa	
8:00-9:00	Śniadanie
13:00	Obiad
15:00-16:30	Sesja konferencyjna – przewodniczy dr. inż. Roman Bukowski
15:00-15:30	Jacek NURZYŃSKI <i>Wpływ szczelin i otworów na izolacyjność akustyczną przegród budowlanych</i>
15:30-16:00	Witold MIKULSKI <i>Wpływ tła akustycznego na promień rozproszenia w pomieszczeniach biurowych open space</i>
16:00-16:30	Jerzy MACIEJCZYK <i>Metrologia prawna – fakty i mity</i>
16:30-17:00	Przerwa kawowa
17:00-18:30	<i>Czas wolny</i>
18:30-19:00	Sesja posterowa IOS, SZ AFiK i SZ AŚiW
	Agnieszka LISOWSKA-LIS, Marcin W. LIS <i>Acoustic noise in artificial poultry hatching plants as element of the animal welfare and the work environment</i>
19:00-20:00	Kolacja
20:00-...	Sesja posterowa IOS, SZ AFiK i SZ AŚiW (cd)

2020-02-27 – Czwartek	
8:00-9:00	Śniadanie
9:00-16:00	Seminarium szkoleniowe firmy SVANTEK Akustyka budowlana Problematyka pomiaru izolacyjności akustycznej przegród budowlanych oraz współczynnika zrozumiałości mowy
9:00-9:15	Rejestracja uczestników
9:15-9:30	Otwarcie seminarium
9:30-10:30	<i>Pomiary izolacyjności akustycznej przegród budowlanych – część teoretyczna</i>
10:30-11:30	<i>Pomiary izolacyjności akustycznej przegród budowlanych z użyciem dwóch mierników SVAN 979 i aplikacji Building Acoustics Assistant</i>
11:30-11:45	Przerwa kawowa
11:45-13:30	Dr inż. Paweł DZIECHCIŃSKI – Politechnika Wrocławska <i>Pomiary współczynnika zrozumiałości mowy STIPA – część teoretyczna</i>
13:30-14:30	Lunch
14:30-15:30	<i>Pomiary współczynnika zrozumiałości mowy STIPA oraz czasu pogłosu przy użyciu SVAN 979 i aplikacji Building Acoustics Assistant</i>
15:30-16:00	Podsumowanie szkolenia i zakończenie seminarium
16:30-17:00	Przerwa kawowa
17:00-17:10	Zakończenie XLVIII SZ AŚiW
17:10-19:00	<i>Czas wolny</i>
19:00	Kolacja

2020-02-28 – Piątek	
8:00	Śniadanie

**Oddział Górnośląski
Polskiego Towarzystwa Akustycznego
Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk**

**Materiały XLIX Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska
i Wibroakustyki**

**Gliwice-Szczyrk
2022-02-28 ÷ 03-04**

Komitety Programowy
XLIX Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk, 2022-02-28 ÷ 03-04

prof. dr hab. inż. Wojciech BATKO (AGH)

dr hab. inż. Grażyna GRELOWSKA (PGd)

prof. zw. dr hab. Edward HOJAN (UAM)

prof. dr hab. inż. Jan KAŻMIERCZAK (PŚI)

dr hab. Janusz KOMPAŁA (GIG)

prof. dr hab. inż. Eugeniusz KOZACZKA (PGd)

prof. dr hab. inż. Marek PAWEŁCZYK (PŚI)

dr hab. inż. Dariusz PLEBAN (CIOP – PIB)

dr inż. Krzysztof RUDNO-RUDZIŃSKI (PWr)

dr hab. Ewa SKRODZKA (UAM)

Prof. dr hab. inż. Antoni ŚLIWIŃSKI

prof. dr hab. inż. Stefan WEYNA (ZUT)

prof. dr hab. inż. Jerzy WICIAK (AGH)

Komitety Organizacyjny
XLIX Szkoły Zimowej
Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk, 2022-02-28 ÷ 03-04

Koordinator Szkół Zimowych, Przewodniczący Oddziału Górnośląskiego PTA

dr hab. inż. Franciszek WITOS

Skarbnik Szkół Zimowych, Skarbnik Oddziału Górnośląskiego PTA

dr inż. Aneta OLSZEWSKA

Sekretarz Szkół Zimowych, Sekretarz Oddziału Górnośląskiego PTA

dr hab. inż. Dariusz BISMOR

Chairman Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki

dr inż. Roman BUKOWSKI

XLIX Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki

Szczyrk, 2022-02-28 ÷ 03-04

SPIS TREŚCI

Autor(rzy)/Tytuł	Str.
1. ŁADA Krzysztof, SZCZEPAŃSKI Grzegorz <i>Badanie numeryczne akustycznego metamateriału labiryntowego</i>	43
2. MIKULSKI Witold <i>Maskowanie dźwięku w biurowych pomieszczeniach open space – kryteria oceny równomierności nagłośnienia, źródła maskujące</i>	49
3. NURZYŃSKI Jacek <i>Wypadkowa izolacyjność akustyczna lekkiej szkieletowej ściany zewnętrznej z oknem</i>	67
4. PLEBAN Dariusz, SZCZEPAŃSKI Grzegorz, RADOSZ Jan, MORZYŃSKI Leszek <i>Stanowisko laboratoryjne do odtwarzania hałasu turbin wiatrowych</i>	73
5. PODLEŚNA Marlena, MORZYŃSKI Leszek, ŁADA Krzysztof, WŁUDARCZUK Anna, KWARTNIK Michał <i>Ultradźwiękowa technika haptyczna – działanie, przewidywane zastosowania i ocena zagrożenia hałasem ultradźwiękowym</i>	85
6. ŚMIETANKA Hubert, KACPEREK Mateusz, KALWASIŃSKI Krzysztof, DANECKI Ryszard <i>Ocena oddziaływania akustycznego farmy wiatrowej Głuchów podczas jej eksploatacji</i>	95
Indeks autorów	115
Dodatek 1 – Z historii – XLVIII SZ AŚiW	117
Dodatek 2 – Program XLIX SZ AŚiW	123

BADANIE NUMERYCZNE AKUSTYCZNEGO METAMATERIAŁU LABIRYNTOWEGO

Krzysztof ŁADA, Grzegorz SZCZEPAŃSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

1. METAMATERIAŁY AKUSTYCZNE

Metamateriały akustyczne to sztucznie wytworzone struktury umożliwiające kontrolowanie fali dźwiękowej, które mają zastosowanie np. w maskowaniu akustycznym. Przy zastosowaniu odpowiedniego rodzaju kształtu struktury możliwe jest uzyskanie ujemnego współczynnika załamania [1], ujemnego modułu odkształcenia objętościowego (współczynnika sprężystości objętościowej) [2] czy ujemnej masy efektywnej [3]. Badania dowodzą, że materiały takie z powodzeniem mogą posiadać właściwości soczewek akustycznych [4]. Podziału metamateriałów można dokonać bazując na równaniu fali w przestrzeni trójwymiarowej, które ma postać:

$$\nabla^2 P - \frac{\rho}{\kappa} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

gdzie prędkość dźwięku jest definiowana jako:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \quad (2)$$

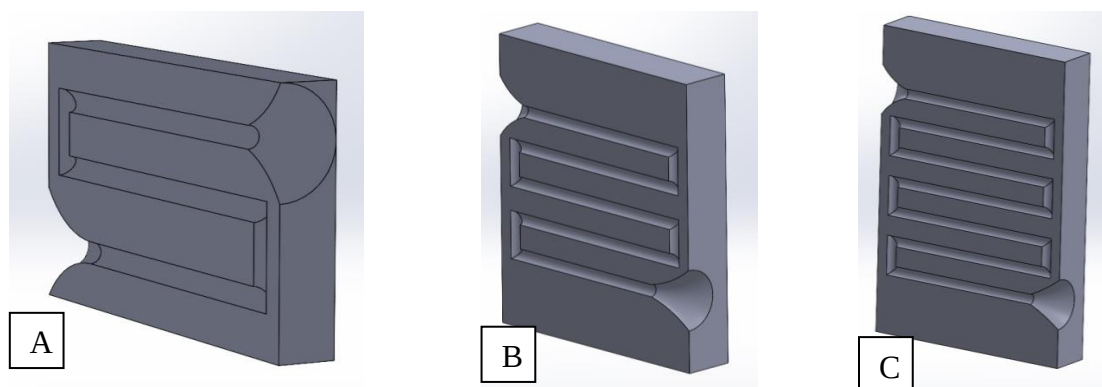
W metamateriałach akustycznych dwa parametry, tj. współczynnik sprężystości objętościowej κ oraz gęstości ρ rozpatrywane są w sensie tzw. efektywnego medium. Często w opisie właściwości metamateriałów mówi się o uzyskiwaniu ujemnych wartości tych parametrów. Ujemna gęstość jest jednak kwestią pewnych założeń modelu fizycznego, w rzeczywistości nie występują materiały, które posiadałyby ujemną gęstość. Znak minus jest tu wynikiem przyjętych założeń, związanych z pominięciem struktury elementów wewnątrz metamateriału (najczęściej są to rezonatory) i przyjęciu ich jako jednorodnego ciała stałego o całkowitej masie [5]. W wielu przypadkach elementy te są elementami sprężystymi, zaczepionymi wewnątrz zewnętrznych ścianek metamateriału przez co przy postrzeganiu właściwości metamateriału mówi się raczej o efektywnym medium i parametrze ujemnej gęstości efektywnej. Efektywna gęstość jest zależna od częstotliwości rezonansowej elementu składowego metamateriału i gdy częstotliwość wymuszenia działająca na metamateriał będzie bliska częstotliwości rezonansowej lokalnej struktury metamateriału przyjmuje ona znak ujemny. Gdy jeden z tych parametrów jest ujemny mamy do czynienia ze zwiększoną dźwiękochłonnością materiału.

Osobną grupę metamateriałów tworzą te o strukturze labiryntowej. W literaturze są one polecane w szczególności w aeroakustyce. Ich zasada działania polega na zmniejszeniu prędkości fazowej fali, co jest możliwe poprzez wydłużenie drogi przejścia fali dźwiękowej. To, że metamateriały typu labiryntowego wykazują ujemny współczynnik załamania fali zostało potwierdzone eksperymentalnie [6]. Możliwe jest również wytworzenie powierzchni labiryntu, która może umożliwiać niemal dowolną złożoną modulację czoła fali [7]. W większości artykułów spotkać można zygzakowatą strukturę labiryntu [8]. Większość struktur labiryntowych wytwarzana jest za pomocą druku 3D.

W ramach pracy przedstawiono wyniki badania numerycznego w postaci rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego dla płaskiej fali dźwiękowej padającej na metamateriał o przykładowej strukturze labiryntowej.

2. PRZYGOTOWANIE BADANIA NUMERYCZNEGO

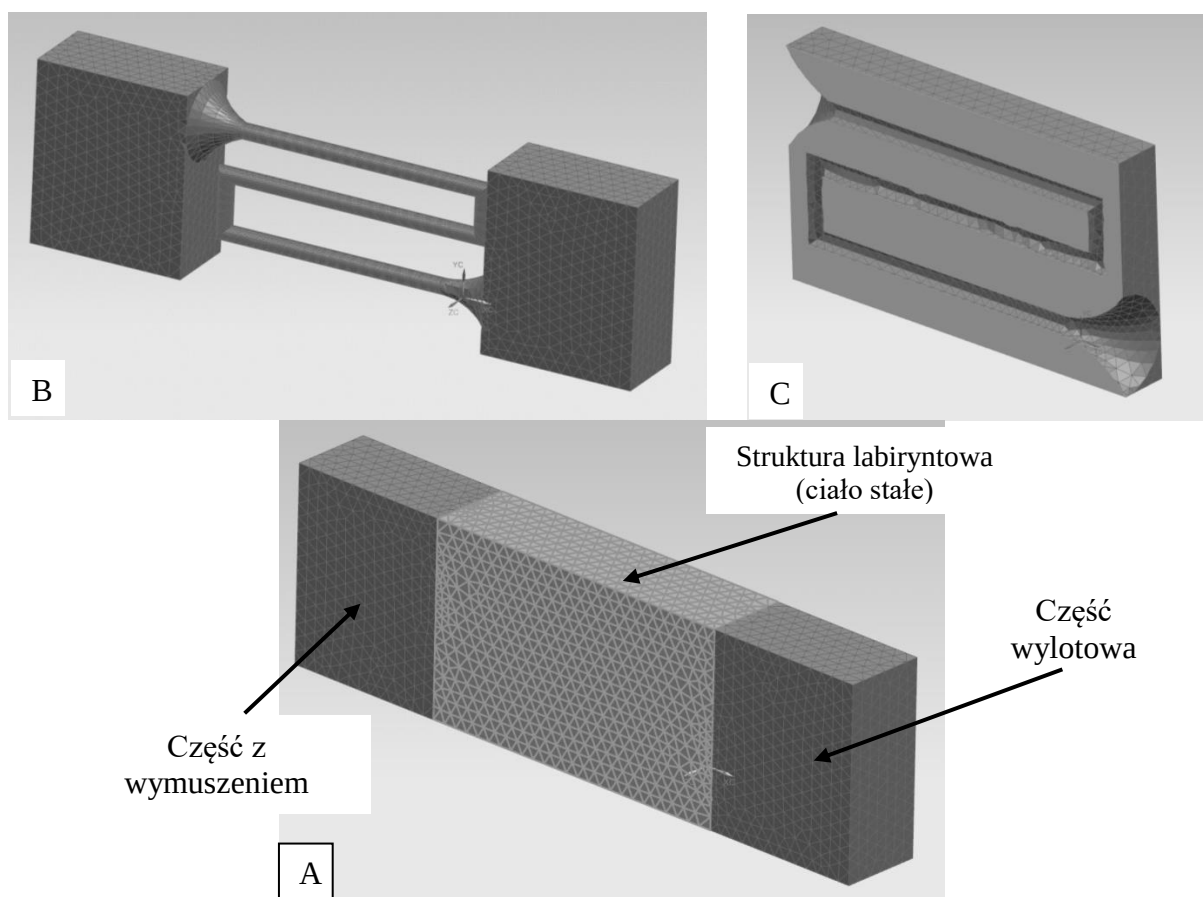
Badania numeryczne przeprowadzono przy wykorzystaniu środowiska symulacyjnego Simcenter 3D w wersji 12. Jest to środowisko bazujące na silniku obliczeniowym Nastran NX, umożliwiające wykonywanie sprzężonych analiz wibroakustycznych opartych o metodę elementów skończonych (MES). Środowisko to jest wykorzystywane przede wszystkim na etapie prac projektowych, w celu pominięcia żmudnego i często kosztownego etapu weryfikacji grupy założeń wstępnych dla prototypów maszyn. Daje ono możliwość zasymulowania warunków rzeczywistych i zobrazowania m. in. wzajemnego wpływu danej struktury oraz wymuszenia (w postaci fali dźwiękowej). Do badań wykonano 3 modele bryłowe wykonane za pomocą oprogramowania SolidWorks 2021, które zostały zaimportowane do środowiska symulacyjnego. Modele te przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Modele bryłowe struktur labiryntowych z: A – 3 torami wewnętrznymi, B – 5 torami wewnętrznymi, C – 7 torami wewnętrznymi.

Zamodelowane układy mają strukturę z tunelami w układzie meandrycznym z zaokrąglonymi narożnikami przy otworze wyjściowym i wejściowym. Badania numeryczne

wykonano dla pojedynczej średnicy tunelu wynoszącej 15 mm oraz liczbie torów równej 3, 5 i 7. Modele zostały podzielone na składowe objętości w celu przyporządkowania siatek obliczeniowych (Rys. 2). Do obliczeń rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w powietrzu przyporządkowano siatkę czworościenną *CTETRA(4)* – *Acoustic Fluid* dedykowaną do obliczeń mechaniki płynów. Obliczenia dla struktury labiryntowej dokonano dla siatki czworościennej typu *CTETRA (4)*, dedykowaną do obliczeń mechanicznych dla ciał stałych. Rozmiar elementów siatki w obydwu przypadkach ustawiono na 8 mm. Dokonano dopasowania siatek w miejscach połączeń płyn-ciało stałe. Ścianki boczne części z wymuszeniem oraz części wylotowej ustanowiono jako pochłaniacze akustyczne z impedancją akustyczną równą impedancji powietrza.

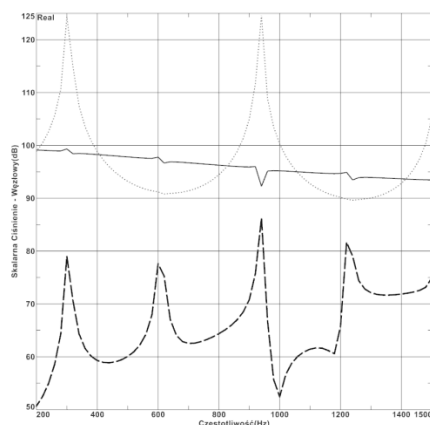


Rys. 2. Modele bryłowe z nałożoną siatką obliczeniową (A – widok połączonych modeli, B – widok części modelu z nałożoną siatką obliczeniową dla powietrza, C – widok części modelu z nałożoną siatką obliczeniową dla ciała stałego)

Przyjęto utwierdzenie modelu na ściankach bocznych struktury labiryntowej. Jako wymuszenie przyjęto falę płaską o ciśnieniu akustycznym równym 5 Pa z przemieszczaniem częstotliwości w zakresie od 200 Hz do 1500 Hz z krokiem co 10 Hz. Jako materiał struktury labiryntowej przyjęto poliwęglan dla którego ustawiono w parametrach obliczeń kryterium plastyczności von Misesa dla stałego natężenia naprężenia ścinającego. Wykonane symulacje

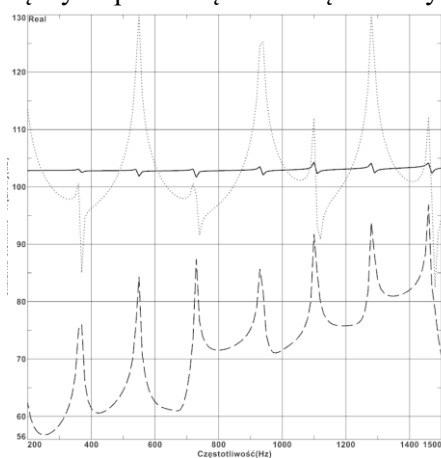
numeryczne były typu symulacji sprzężonych (wzajemny wpływ struktury i powietrza), badania wykonano w dziedzinie częstotliwości.

3. WYNIKI BADANIA NUMERYCZNEGO METAMATERIAŁÓW AKUSTYCZNYCH



Rys. 3. Poziom ciśnienia akustycznego dla struktury labiryntowej 3 torowej, w węzle znajdującym się:

linią ciągłą – na wejściu labiryntu,
linią przerywaną – na wyjściu labiryntu,
linią kropkowaną – wewnątrz labiryntu.

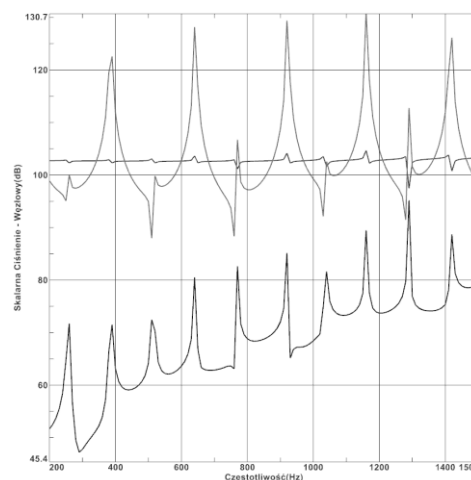


Rys. 4. Poziom ciśnienia akustycznego dla struktury labiryntowej 5 torowej, w węzle znajdującym się:

linią ciągłą – na wejściu labiryntu,
linią przerywaną – na wyjściu labiryntu,
linią kropkowaną – wewnątrz labiryntu

Na przedstawionych wykresach zgodnie z oczekiwaniami widoczny jest niższy poziom ciśnienia akustycznego po stronie wylotu ze struktury labiryntowej. Ilość występujących przerw pasmowych oraz ich zakres częstotliwości zależy od liczby wewnętrznych torów metamateriału. Koniec zakresu występowania przerw pasmowych zaobserwowano dla tych częstotliwości, dla których poziom ciśnienia akustycznego wewnątrz struktury labiryntowej był

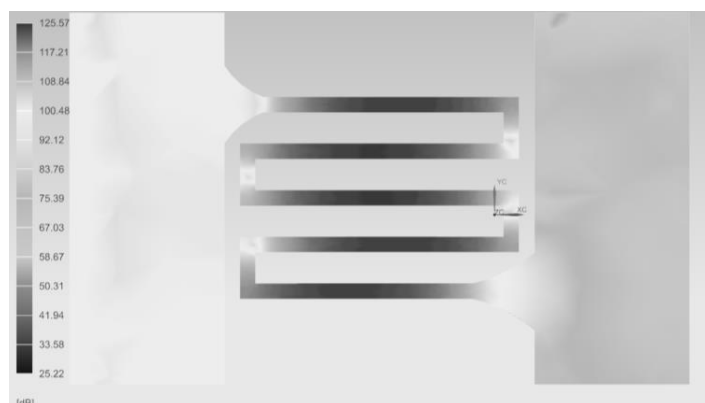
W efekcie przeprowadzonych symulacji uzyskano rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w dyskretnych punktach siatki obliczeniowej. Przyjęto łącznie 3 punkty, dla których wyznaczono zależność poziomu ciśnienia akustycznego od częstotliwości. Były to punkty znajdujące się: na wejściu labiryntu, punkt ulokowany wewnątrz struktury labiryntowej oraz na wyjściu labiryntu. Wykresy obrazujące wyznaczone zależności przedstawiono na Rys. 3–5.



Rys. 5. Poziom ciśnienia akustycznego dla struktury labiryntowej 7 torowej, w węzle znajdującym się:

linią ciągłą – na wejściu labiryntu,
linią przerywaną – na wyjściu labiryntu, linią kropkowaną – wewnątrz labiryntu

najwyższy i najniższy. Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w obrębie całego obliczanego modelu dla przykładowych częstotliwości przedstawiono na Rys. 6 i 7.



Rys. 6. Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego wewnątrz i na zewnątrz metamateriału labiryntowego dla częstotliwości 940 Hz.



Rys. 7. Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego wewnątrz i na zewnątrz metamateriału labiryntowego dla częstotliwości 1030 Hz.

Zamodelowane wymuszenie falą płaską pozwoliło uzyskać stabilny poziom ciśnienia akustycznego wynoszący około 100 dB po stronie wlotowej. Poziom ciśnienia akustycznego po stronie wylotowej ściśle zależy od częstotliwości. Wewnątrz struktury na skutek lokalnego rezonansu dochodzi do wzmocnienia poziomu ciśnienia akustycznego. W rzeczywistości uzyskiwany poziom będzie niższy ponieważ wykorzystywane oprogramowanie nie umożliwia pełnego zamodelowania efektów lepko-termicznych. Straty lepko-termiczne pozwalają w przypadku bardzo wąskich szczelin uniknąć wzbudzenia rezonansów Fabry'ego-Perota, prowadząc do pełnego odbicia fali dźwiękowej w wąskich pasmach częstotliwości [9].

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych metamateriału akustycznego o strukturze labiryntowej. Badania przeprowadzone zostały przy wykorzystaniu pakietu obliczeniowego Simcenter 3D Siemens oraz metody elementów skończonych. Przedstawiono

rozkład wartości poziomu ciśnienia akustycznego dla wybranego zakresu częstotliwości. Uzyskane wyniki wskazują na występowanie rezonansów wewnątrz metamateriału labiryntowego. Uzyskane dane posłużyły jako wkład merytoryczny do realizacji badań numerycznych na modelach metamateriałów akustycznych wyposażonych w rezonatory Hoelmholtza.

5. PODZIĘKOWANIE

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, projekt nr III.PB.05 pt. „Rozwój i badania właściwości ultradźwiękowej technologii haptycznej ze szczególnym uwzględnieniem możliwości jej zastosowania na potrzeby osób niepełnosprawnych”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

6. LITERATURA

1. Xie Y., Popa B.-I., Zigoneanu L., Cummer S. A., „Measurement of a Broadband Negative Index with Space-Coiling Acoustic Metamaterials“, *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, 2013, 110, 175501
2. Lee S H., Park C. M., Seo Y. M., Wang Z. G., Kim C. K., „Acoustic Metamaterials with Negative Modulus“, *J. Phys Cond. Matter* 21, 175704
3. Ding Y. Q., Liu Z. Y., Qiu C. Y., Shi J., „Metamaterial with Simultaneously Negative Bulk Modulus and Mass Density“, *Phys. Rev. Lett.* 99, 2007, 093904
4. Li J., Fok L., Yin X., Bartal G., Zhang X., „Experimental Demonstration of an Acoustic Magnifying Hyperlens“, *Nat. Mater.* 8, pp. 931-934, 2009
5. Sheng P., Zhang X. X., Liu Z., Chan C. T., „Locally resonant sonic materials“, *Physica B* 338, 2003, pp. 201–205
6. Xie Y., Popa B.-I., Zigoneanu L., Cummer S. A., „Measurement of a Broadband Negative Index with Space-Coiling Acoustic Metamaterials“, *Phys. Rev. Lett.* 110, 2013, 175501
7. Xie Y., Wang W., Chen H., Konneker A., Popa B.-I., Cummer S. A., *Nat. Commun.*, 5, p. 5553, 2014
8. Liang Z., Li J., „Extreme Acoustic Metamaterial by Coiling Up Space“, *Fiz. Rev. Lett.* , 108, 2012, art. 114301
9. Molerón M., Serra-Garcia M., Daraio C., „Visco-thermal effects in acoustic metamaterials: from total transmission to total reflection and high absorption“, *New Journal of Physics*, IOP Publishing, 2016, 18, 033003

MASKOWANIE DŹWIĘKU W BIUROWYCH POMIESZCZENIACH OPEN SPACE – KRYTERIA OCENY RÓWNOMIERNOŚCI NAGŁOŚNIENIA, ŹRÓDŁA MASKUJĄCE

Witold Mikulski

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa, Czerniakowska 16, wimik@ciop.pl

1. WPROWADZENIE

Maskowanie dźwięków niepożądanych stosuje się w wielu sferach życia człowieka. W pracy biurowej, w biurowych wieloprzestrzennych pomieszczeniach open space, maskowanie dźwięków niepożądanych stosuje się stosunkowo od niedawna [1, 2, 3]. W 2012 r. uzgodniono międzynarodowy standard i powstała norma PN EN ISO 3382–3:2012 [3], w której określono wielkości i wartości kryterialne charakteryzujące właściwości akustyczne biurowych pomieszczeń open space. W Polsce dopiero w 2015 roku w normie PN–B–02151-4:2015 [4] określono pierwsze kryterium oceny akustycznej pomieszczeń, określające właściwości pogłosowe różnego typu pomieszczeń (norma ta jest obligatoryjna, ponieważ przywołana jest w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [5]). W odniesieniu do biurowych pomieszczeń open space określono w tej normie minimalną wartość chłonności akustycznej pomieszczenia (odniesioną do powierzchni jednostkowej rzutu pomieszczenia, wynoszącą $1,1 \text{ m}^2$). W normie PN EN ISO 3382–3:2012 [3] właściwości akustyczne biurowych pomieszczeń open space określa się dużo bardziej precyzyjnie. Kryteria w niej podane charakteryzuje się poziomem dźwięku w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy (wielkości kryterialne: poziom dźwięku A w odległości 4 m od wzorcowego źródła mowy $L_{p,A,S,4m} \leq 48 \text{ dB}$ i różnica poziomów dźwięku A w odległości 1 m i 2 m od wzorcowego źródła mowy $D_{2,S} \geq 7 \text{ dB}$) oraz wskaźnika transmisji mowy STI w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy (wielkości kryterialne: promień (odległość) rozproszenia $r_D \leq 5 \text{ m}$ oraz promień (odległość) prywatności r_P (dla którego nie podano wartości kryterialnej)). Norma PN EN ISO 3382–3:2012 [3] nie jest w Polsce obligatoryjna i prawdopodobnie dlatego, co wynika z badań (m. in. autora) przeprowadzonych w kilkunastu pomieszczeniach [6], eksploatowane pomieszczenia nie spełniają tam podanych kryteriów, tzn. nie mają odpowiednich właściwości akustycznych. Z kryteriów podanych w ww. normach najtrudniej jest osiągnąć kryterium na promień rozproszenia r_D . Z badań symulacyjnych autora (programem ODEON [7]) wynika, że

spełnienie tego kryterium wymaga nie tylko zastosowania adaptacji akustycznej pomieszczenia (materiały dźwiękochłonne na suficie i ścianach pomieszczenia) i stanowisk pracy (ekrany akustyczne) [8], ale również zastosowania dźwięków maskujących [9, 10]. Wynika z tego, że w procesie budowy nowych lub modernizacji istniejących pomieszczeń biurowych open space, konieczne jest zastosowanie, a wcześniej zaprojektowanie, zarówno adaptacji akustycznej pomieszczenia, jak i systemów maskujących dźwięki niepożądane [8-11]. Elementem projektu akustycznego powinna być prognoza (właściwie predykcja) warunków akustycznych w pomieszczeniu. Projekt ten polegać powinien na określeniu skuteczności różnych rozwiązań adaptacji akustycznej i systemów maskowania oraz wybór takiego rozwiązania które spełnia ww. kryteria [11]. Ponieważ maskowanie dźwięku stosuje się do uzyskania odpowiednich warunków pracy, uwzględnionych w kryteriach odnoszących się do właściwości akustycznych pomieszczenia, określonych w PN EN ISO 3382-3:2012 [3] (w szczególności promienia rozproszenia r_D), to kryterium odnoszące się do tej wielkości fizycznej, autor stosuje w badaniach, jako wielkość charakteryzującą skuteczne maskowanie dźwięków [9, 10, 12, 13, 14]. W artykule zostaną omówione trzy aspekty zastosowania dźwięków maskujących w pomieszczeniu biurowym open space, których analizę wykonano z zastosowaniem symulacji obliczeniowej programem ODEON [7]. Są to: określenie relacji między dwoma wielkościami charakteryzującymi równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia, analiza możliwości ograniczenia liczby źródeł maskujących przez zastosowanie kolumn dźwiękowych oraz określenie wymaganego widma częstotliwościowego poziomu mocy akustycznej zastosowanych głośników w kolumnach dźwiękowych.

2. UŚCIŚLENIE KRYTERIÓW OCENY RÓWNOMIERNOŚCI NAGŁOŚNIENIA POMIESZCZENIA BIUROWEGO OPEN SPACE – OKREŚLENIE RELACJI MIĘDZY MAKSYMALNĄ RÓŻNICĄ I ODCHYLENIEM STANDARDOWYM POZIOMU DŹWIĘKU A DŹWIĘKU MASKUJĄCEGO W OBSZARZE PRACY

W publikacjach [9, 13] określono minimalny poziom dźwięku A dźwięku maskującego (dla czterech typów widma częstotliwościowego), który razem z odpowiednią adaptacją akustyczną pomieszczenia umożliwia uzyskanie właściwości akustycznych rozpatrywanego pomieszczenia spełniających kryteria PN EN ISO 3382-3:2012 [3] i PN-B-02151-4:2015 [4]. Dźwięk maskujący ma wpływ na kryterium podane w PN EN ISO 3382-3:2012 [3] określone wielkością promieniem rozproszenia r_D (także promieniem rozproszenia r_P , który pominięto w niniejszym artykule, ponieważ dotychczas nie określono jego wartości kryterialnej). W artykule uwzględnia się dźwięk maskujący o widmie szumu różowego (jednakowe poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych z zakresu 63-16000 Hz – dźwięk umożliwiający spełnienie kryterium na

promień rozproszenia r_D , przy najniższej wartości poziomu dźwięku A tj. 30 dB). Dlatego w artykule przyjęto, że minimalny poziom dźwięku A dźwięku maskującego $L_{p,A,mask,min}$ jest równy:

$$L_{p,A,mask,min} = 30 \text{ dB} \quad (1)$$

Przyjęto także (podobnie jak w innych artykułach autora [9, 10, 12, 13, 14]), że maksymalny poziom dźwięku A dźwięku maskującego jest równy dopuszczalnemu poziomowi dźwięku A hałasu tła akustycznego od wyposażenia technicznego budynku. Dlatego wg PN-B-02151-2:2018 [15] wynosi:

$$\begin{aligned} L_{p,A,mask,max} &= L_{p,A,eq,nT} + 10 \log \frac{T_{500-2000\text{Hz}}}{T_0} = L_{p,A,eq,nT} + 10 \log \frac{A_0}{A_{500-2000\text{Hz}}} = \\ &= 40 + 10 \log \frac{1,1}{A_{500-2000\text{Hz},1m^2}} = 40,4 - 10 \log(A_{500-2000\text{Hz},1m^2}) \text{ dB} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie

$L_{p,A,eq,nT}$ – wzorcowy maksymalny (najwyższy dopuszczalny) poziom dźwięku A, wg PN-B-02151-2:2018 [15], dla „biur wielkoprzestrzennych oraz pokoi biurowych typu open space” wynosi 40 dB,

$T_{500-2000\text{Hz}}$ – średni, z oktaowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000 i 2000 Hz, czas pogłosu pomieszczenia, w sekundach,

T_0 – dopuszczalny czas pogłosu pomieszczenia, w sekundach, (można oszacować ze wzoru Sabine’a z dopuszczalnej chłonności akustycznej podanej w PN-B-02151-4:2015 [4]), w sekundach,

$A_{500-2000\text{Hz}}$ – średnia z oktaowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000 i 2000 Hz chłonność akustyczna pomieszczenia, w m^2 ,

$A_{500-2000\text{Hz},1m^2}$ – średnia z oktaowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000 i 2000 Hz chłonność akustyczna pomieszczenia odniesiona do 1 m^2 powierzchni rzutu pomieszczenia, w m^2 ,

A_0 – minimalna dopuszczalna chłonność akustyczna pomieszczenia, w m^2 , (wg PN-B-02151-4:2015 [4] równa polu powierzchni rzutu pomieszczenia w m^2 razy 1,1).

W typowych biurowych pomieszczeniach open space wartość maksymalnego poziomu dźwięku A $L_{p,A,mask,max}$ dźwięku maskującego powinna się wówczas zawierać w przedziale 37-39,5 dB. Dla bezpieczeństwa projektowego, w artykule przyjęto:

$$L_{p,A,mask,max} = 37 \text{ dB} \quad (3)$$

UWAGA 1: W badaniach konieczne jest przyjęcie oczywistego uproszczenia wynikającego z praktycznej możliwości określenia wartości minimalnej i maksymalnej ($L_{p,A,mask,min}$ i $L_{p,A,mask,max}$) w obszarze, w którym należy zapewnić maskowanie dźwięków. Ze względów praktycznych, w rozpatrywanym obszarze, poziom dźwięku A określa się w ograniczonej (to nie znaczy małej), liczbie punktów obserwacji (próbki). Przyjęto, że gdy próbki znajdują się w niewielkiej odległości od siebie, to rzeczywiste wartości ekstremalne poziomu dźwięku A próbek, będą dobrze reprezentowały wartości

maksymalną i minimalną w rozpatrywanym obszarze. W analizie obliczeniowej przyjęto odległość punktów obliczeniowych 0,6 m, co odpowiada długości boku kasetowego elementu dźwiękochłonnego w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym lub połowie szerokości biurka pracowników. W artykule obok wyników obliczeń w punktach obserwacji podano także wyniki obliczeń w postaci map poziomu dźwięku, które są wyznaczane również z obliczeń wykonanych przez program ODEON w automatycznie generowanej siatce punktów obliczeniowych (która nie pokrywa się z ww. siatką punktów obserwacji). Ponieważ te pierwsze obliczenia wykonuje się z większą dokładnością, to mapy poziomu dźwięku należy traktować jako szacunkowe obrazowanie jakościowe. Efekt ten jest widoczny na rysunkach na których pokazano te mapy (w niektórych miejscach tekstu podano dwie wartości: z obliczeń i odczytane z mapy).

Przyjmując określone wzorami (1) i (3) minimalny i maksymalny poziom dźwięku A dźwięku maskującego, to maksymalna różnica wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ powinna spełnić kryterium:

$$\Delta L_{p,A,mask,max} = L_{p,A,mask,max} - L_{p,A,mask,min} \leq 7 \text{ dB} \quad (4)$$

UWAGA 2: W niektórych wcześniejszych publikacjach autora przyjmowano maksymalną różnicę wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ uwzględniając także dźwięki o innych widmach częstotliwościowych, tj. dźwięki o mniejszej skuteczności maskowania np. [9, 10]. W tamtych przypadkach przyjęta maksymalna różnica wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ była różna od 7 dB, np. równa 5 dB w [12]. W ostatnich badaniach autora [13, 14] oraz niniejszym artykule przyjęto tą wartość na równą 7 dB.

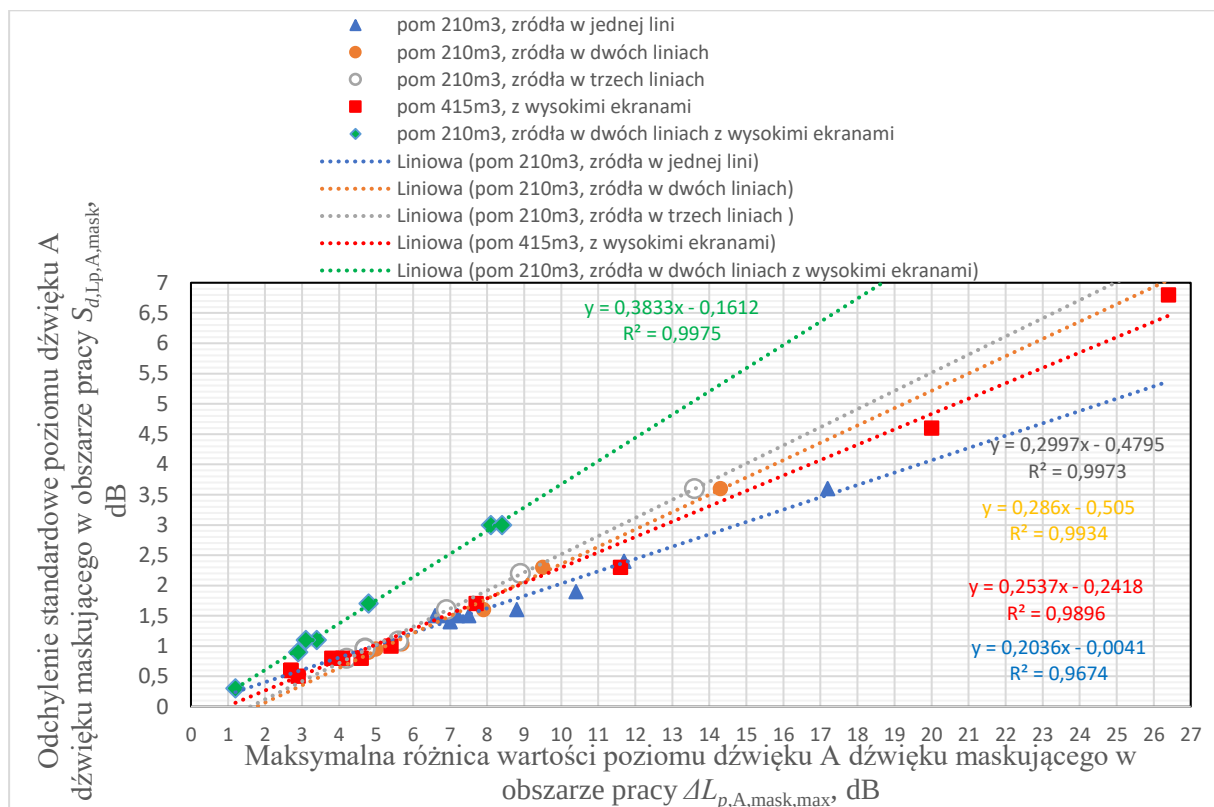
Ponieważ w systemach maskujących można dowolnie (ale jednocześnie w całym obszarze pomieszczenia) regulować poziom dźwięku A dźwięku maskującego, w rozważaniach uzyskania odpowiedniego dźwięku maskującego w obszarze pracy, można się ograniczyć do uzyskania równomiernego nagłośnienia dźwiękami maskującymi tj. analizę ograniczyć do uwzględnienia kryterium oceny wg zależności nr (4).

W niektórych wcześniejszych publikacjach autora, uwzględniano jednocześnie (np.[10]), a w niektórych zamiennie (np.[12]), zamiast kryterium opartego na maksymalnej różnicy wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$, kryterium oparte na odchyleniu standardowym poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$. Przyjęto tam (arbitralnie, zakładając rozkład normalny wartości poziomu dźwięku A w obszarze pracy oraz 99,8% przedział wartości oczekiwanych określony $<-3S_d, +3S_d>$), że kryterium określone zależnością nr (4), szacunkowo jest tożsame, z kryterium opartym na odchyleniu standardowym poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy tj.:

$$S_{d,Lp,A,mask,wstępnie_szacunkowo} \leq 1 \text{ dB.} \quad (5)$$

(Dla maksymalnej różnicy wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy, $\Delta L_{p,A,mask,max} \leq 5 \text{ dB}$, odchylenie standardowe poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask,wstępnie_szacunkowo} \leq 0,8 \text{ dB}$ [10, 12].)

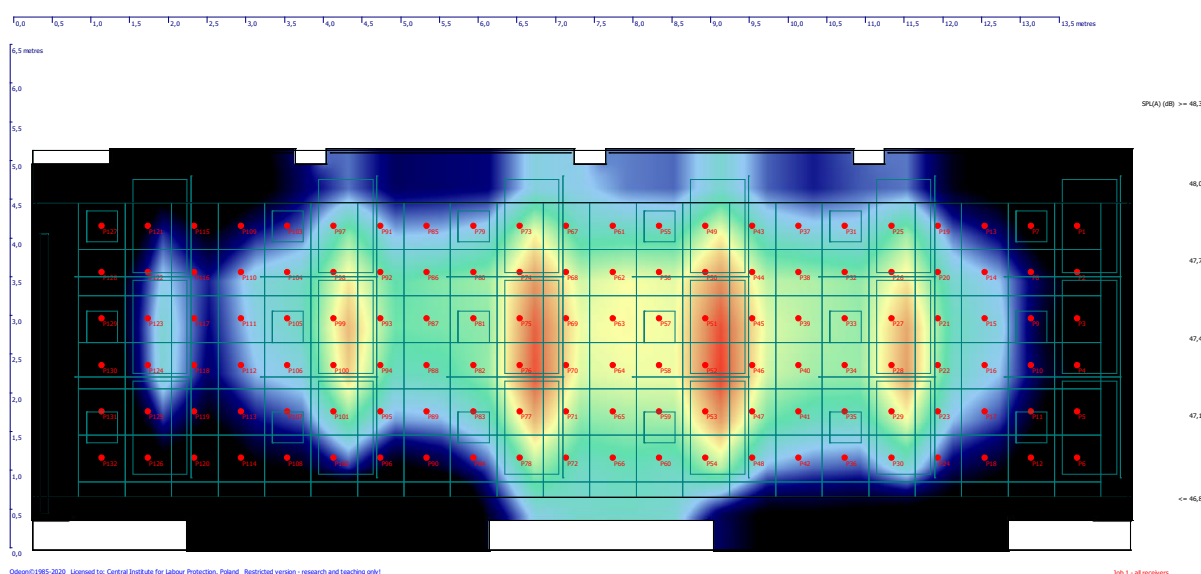
Zależność nr (5) należy uściślić, dlatego poniżej na Rys. 1 podano wyniki badań obliczeniowych określające relację między maksymalną różnicą wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ i odchyleniem standardowym poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$. Badania obliczeniowe programem ODEON wykonano dla dwóch pomieszczeń: pierwsze o kubaturze ok 425 m³, a drugie o kubaturze 210 m³. W tym drugim pomieszczeniu wyniki podano dla trzech układów źródeł maskujących w pomieszczeniu: w jednej, w dwóch i w trzech liniach źródeł.



Rys. 1. Wyniki obliczeń maksymalnej różnicy wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ i odchylenia standardowego poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$, dla dwóch pomieszczeń (dla pomieszczenia o kubaturze 210 m³ w trzech wariantach położenia źródeł maskujących).

Z Rys. 1 wynika, że dla większych wartości maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$, są większe wartości odchylenia standardowego poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$ (co jest dosyć oczywistym wnioskiem). Dla czterech różnych wariantów danych, linie regresji liniowej (z bardzo dobrym dopasowaniem), mają różne nachylenia. Szczególnie większe nachylenie

regresji liniowej wyników obliczeń (a także różniące jej od pozostałych linii regresji) jest dla danych pomieszczenia o kubaturze 210 m^3 z wysokimi ekranami akustycznymi, w którym źródła maskujące rozmieszczone są w dwóch równoległych liniach. Jednakże ten aspekt wyników nie jest znacząco istotny w ustaleniu relacji między rozpatrywanymi wielkościami, gdyż (co wynika ze spełnienia kryterium określonego zależnością nr (4)), w zakresie wartości maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,\text{mask,max}} \leq 7 \text{ dB}$, różnice między różnymi liniami regresji liniowej wyników badań nie są znaczne. Ponadto z badań podanych w [13] wynika, że nie jest możliwe uzyskanie bardzo dużej równomierności nagłośnienia obszaru pracy pomieszczenia, nawet uwzględniając bardzo dużą liczbę źródeł. Przykładowo dla pomieszczenia o kubaturze 210 m^3 i ponad 132 źródeł dźwięku maskującego, (źródła maskujące w całej powierzchni sufitu podwieszanego co $0,6 \text{ m}$), maksymalna różnica poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,\text{mask,max}}$ zawiera się w przedziale ok. $2\text{-}4 \text{ dB}$. Zilustrowano to na Rys. 2 (gdzie można zauważyć, że $\Delta L_{p,A,\text{mask,max}}$ z mapy $\sim 2 \text{ dB}$, a wg dokładnych obliczeń w punktach obserwacji siatki $\Delta L_{p,A,\text{mask,max}} = 3,9 \text{ dB}$; patrz UWAGA 1 powyżej).



Rys. 2. Rozkład w obszarze pracy ($h = 1,2 \text{ m}$) wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w pomieszczeniu o kubaturze 210 m^3 (w suficie podwieszanym uwzględniono 132 źródła/głośniki maskujące skierowane osiami pionowo w dół) (Wykonano programem ODEON).

Wynika z tego, że relację między wartościami maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,\text{mask,max}}$, a wartościami odchylenia standardowego poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,\text{mask}}$, należy określić z danych dla wartości maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy z przedziału $\Delta L_{p,A,\text{mask,max}} = 3\div 7 \text{ dB}$. Z wszystkich wykresów na rys.1 wynika,

że kryterium oparte na odchyleniu standardowym poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$ ma wówczas postać:

$$S_{d,Lp,A,mask} \leq \begin{cases} 1,5 \text{ dB} & \text{dla } \Delta L_{p,A,mask,max} = 7 \text{ dB} \\ 1,0 \text{ dB} & \text{dla } \Delta L_{p,A,mask,max} = 5 \text{ dB} \\ 0,5 \text{ dB} & \text{dla } \Delta L_{p,A,mask,max} = 3 \text{ dB} \end{cases} \quad (6)$$

W praktycznych zastosowaniach systemów maskujących, uwzględniających ograniczenie kosztów, a zatem i liczby źródeł maskujących, wartości maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ będą mniejsze, ale bliskie wartości 7 dB, wówczas kryterium oparte na odchyleniu standardowym poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$ będzie miało postać:

$$S_{d,Lp,A,mask} \leq 1,5 \text{ dB} \quad (7)$$

3. ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA LICZBY ŹRÓDEŁ DŹWIĘKU MASKUJĄCEGO ORAZ OKREŚLENIA WIDMA POZIOMU MOCY AKUSTYCZNEJ ŹRÓDŁA MASKUJĄCEGO

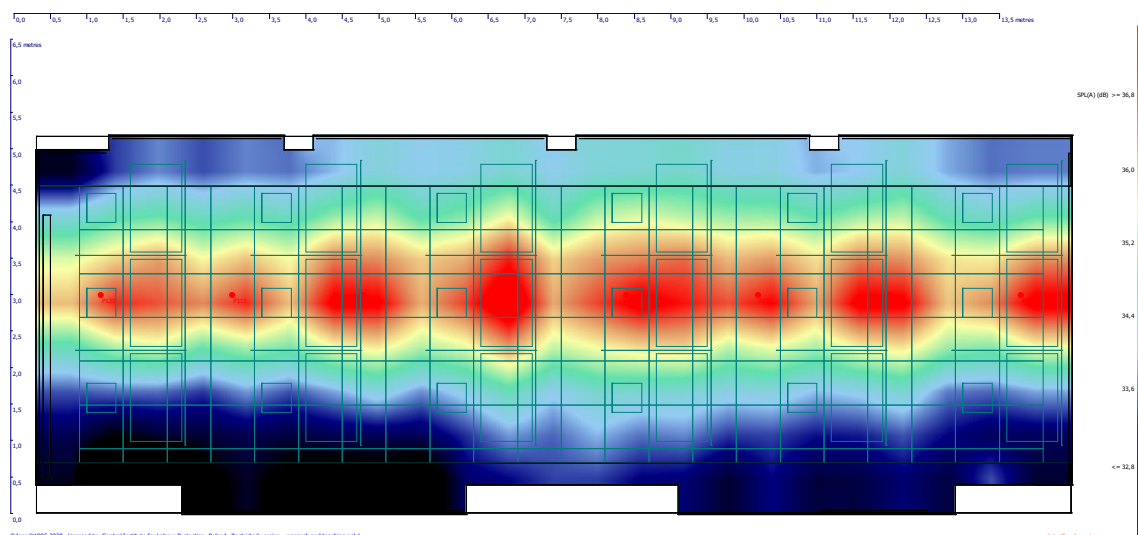
3.1. Wstęp do analizy

W analizie symulacyjnej w modelach numerycznych, aby uzyskać wartościowe dla praktyki wyniki, nie można stosować danych znacznie odbiegających od danych rzeczywistych. W analizie wpływu liczby źródeł maskujących na równomierność nagłośnienia w obszarze pracy biurowego open space, nie można więc zakładać, że źródła dźwięku są wszechkierunkowe i mają płaską w pasmach oktaowych charakterystykę częstotliwościową (szum różowy). Wynika to z dwóch faktów. Po pierwsze - kierunkowość emisji ma silny wpływ na równomierność nagłośnienia pomieszczenia, co wynika z faktu, że od kierunkowości emisji dźwięku ze źródła dźwięku zależy wielkość energii akustycznej, która po wielu odbiciach dotrze do punktu obserwacji (szczególnie, że kierunkowość oraz straty energii akustycznej podczas propagacji, zależą także od częstotliwości). Po drugie – to nie dźwięk emitowany ze źródła (a zatem i poziom mocy akustycznej źródła/głośnika) powinien mieć widmo szumu różowego (patrz [9]). To dźwięk maskujący na stanowisku pracy powinien mieć widmo szumu różowego, więc dźwięk emitowany ze źródła musi być odpowiednio skorygowany w taki sposób, aby uwzględniać transmitancję energii akustycznej między źródłem maskującym, a obszarem odbiorczym. Oba te aspekty będą opisane w poniższych dwóch podrozdziałach.

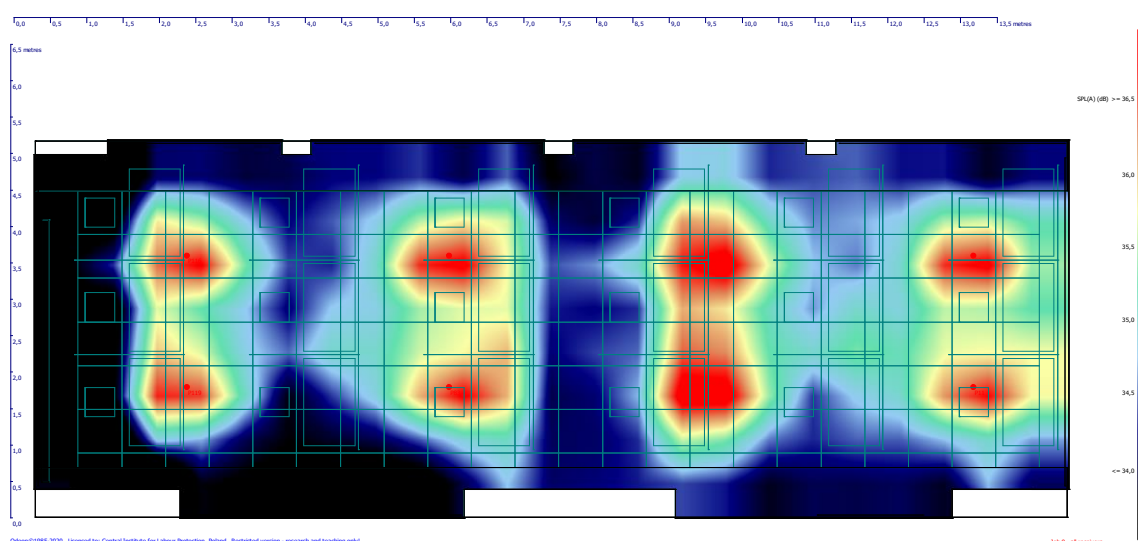
3.2. Analiza możliwości ograniczenia liczby źródeł maskujących przez zastosowanie kolumn dźwiękowych

W publikacjach autora [10, 12, 13] rozpatrywano wpływ równomierności nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym, w zależności od liczby źródeł dźwięku maskującego. W analizie uwzględniono pojedyncze głośniki (emitujące dźwięk maskujący), umieszczane

w podwieszanym suficie dźwiękochłonnym (na wysokości 3-3,5 m, osie główne głośników skierowane pionowo w dół). Z analiz wynika, że przy przyjętym kryterium, tj. zależność nr (4) ($\Delta L_{p,A,mask,max} \leq 7$ dB) w pomieszczeniu o kubaturze 210 m³ wystarczy uwzględnić łącznie 8-9 źródeł maskujących w układzie: w jednej, dwóch lub 3 liniach [13] (Rys. 3a, b, c).



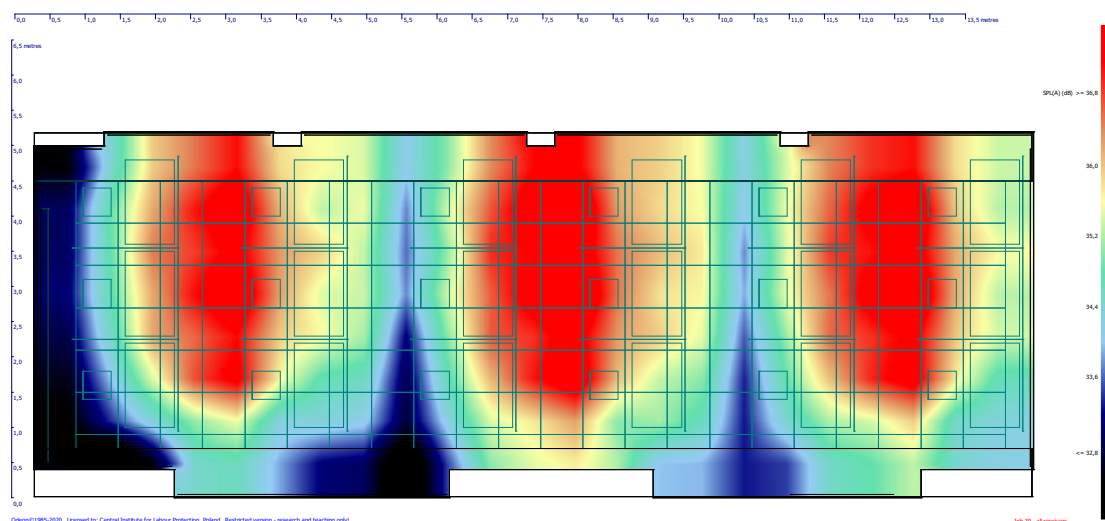
Rys. 3a. Rozkłady w obszarze pracy ($h = 1,2$ m) wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego dla 8 źródeł maskujących w jednej linii – $\Delta L_{p,A,mask,max}$: z obliczeń 7 dB, z mapy 5,6 dB (Wykonano programem ODEON).



Rys. 3b. Rozkłady w obszarze pracy ($h = 1,2$ m) wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego dla 8 źródeł maskujących w dwóch liniach po 4 źródła – $\Delta L_{p,A,mask,max}$: z obliczeń 5,7 dB, z mapy 3,5 dB (Wykonano programem ODEON).

Rozpatrując te trzy układy źródeł, największą równomierność nagłośnienia uzyskuje się dla 8 źródeł umieszczonych po 4 w dwóch liniach (linie równoległe do dłuższej ściany bocznej pomieszczenia ($\Delta L_{p,A,mask,max} = 5,7$ dB; z Rys. 3b można odczytać wartość 3,5 dB; patrz UWAGA 1). Także z innych badań autora (np. [12]) wynika, że układ źródeł/głośników w 2 rzędach daje najmniejsze wartości $\Delta L_{p,A,mask,max}$ (co wynika z faktu, że w rozpatrywanych

pomieszczeniach, w jednej kolumnie pomieszczenia (równoległej do krótszej ściany pomieszczenia) znajdują się w większości przypadków 3-4 stanowiska pracy)).



Rys. 3c. Rozkłady w obszarze pracy ($h = 1,2$ m) wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego dla 9 źródeł maskujących w trzech liniach po 3 źródła – $\Delta L_{p,A,mask,max}$: z obliczeń 6,9 dB, z mapy 5,6 dB (Wykonano programem ODEON).

Zachodzi więc pytanie, czy rozwiązanie systemu maskującego, w którym dwa głośniki w kolumnie skierowane są osiami głównymi do dołu (każdy w jednej linii) można by było zastąpić dwoma głośnikami w jednej linii w kolumnie dźwiękowej „dwuspadowej” (graniastosłup o podstawie trójkąta, umieszczony w suficie podwieszanym, taki sposób, że jedna ściana boczna, graniastosłupa jest równoległa do sufitu, a na dwóch pozostałych ścianach bocznych graniastosłupa są głośniki) [13, 14]. Wówczas osie głównych głośników są w płaszczyźnie prostopadłej do dłuższej ściany pomieszczenia i są skierowane w dół, ale nie pionowo, a rozbieżnie. Dobierając kąt między osiami głównymi głośników, można wpłynąć na równomierność nagłośnienia pomieszczenia. (Przy symulacji obliczeniowej takiego rozwiązania, co jest niezwykle istotne, konieczne jest uwzględnienie rzeczywistych charakterystyk kierunkowych głośników.) Takie rozwiązanie nie tylko może umożliwić uzyskanie równomiernego nagłośnienia obszaru pracy pomieszczenia, ale jest prostsze w instalacji systemu maskującego, jego zasilaniu i jest mniej kosztowne niż instalowanie pojedynczych głośników (możliwość zastosowania głośników o mniejszej mocy elektrycznej).

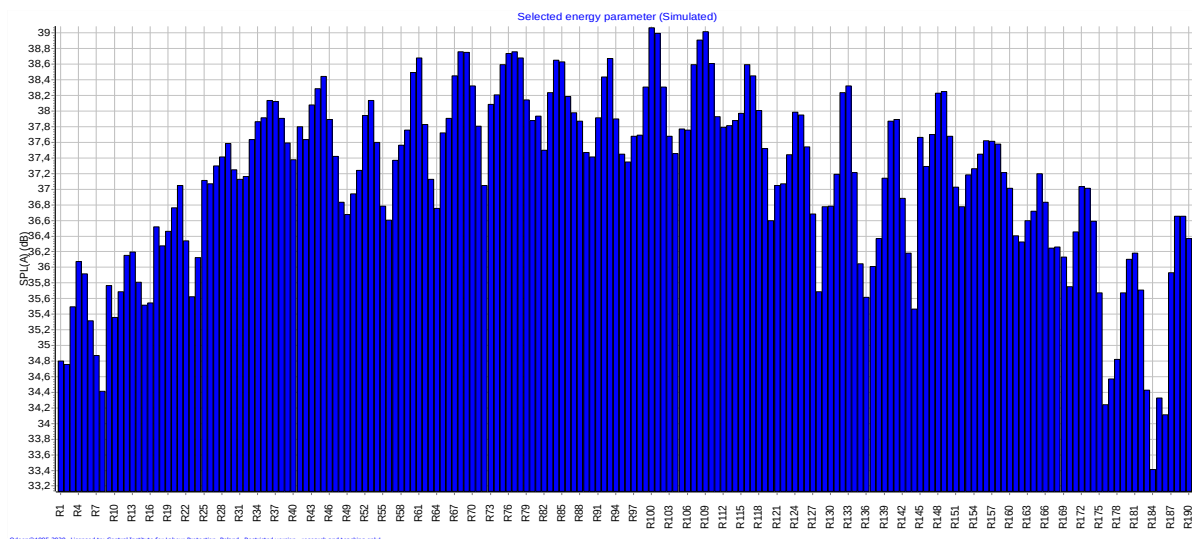
Ponadto, ten sposób można wykorzystać ograniczając liczbę głośników w liniach, tj. w płaszczyźnie równoległej do dłuższej ściany pomieszczenia. Wykorzystuje się tu fakt, że gdy rozpatruje się zastosowanie kolumny dwugłośnikowej, to przez analogię, to samo rozwiązanie można zastosować w kolumnie czterogłośnikowej czterospadowej tj. w kształcie piramidy (ostrosłup o podstawie kwadratowej skierowany wierzchołkiem pionowo w dół). Intuicyjnie można założyć, że liczba kolumn dźwiękowych może być w takim przypadku czterokrotnie

mniejsza w stosunku do pojedynczych głośników. W [10] przeprowadzono badania obliczeniowe równomierności nagłośnienia, uwzględniając takie kolumny dźwiękowe. Wyniki wykazały, że największą równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym obszaru pracy uzyskuje się stosując kolumnę dźwiękową w kształcie piramidy o kącie nachylenia ścian bocznych do podstawy w zakresie 80-90°. Wyraźny efekt zwiększenia równomierności nagłośnienia obszaru pracy pomieszczenia uzyskano już dla kątów powyżej 45°. Kolumnę w kształcie piramidy, o kącie nachylenia ścian bocznych do podstawy ok. 80° (tj. o kształcie zbliżonym do sześciangu) należy uznać za niepraktyczną, trudną do zaakceptowania, gdyż zbyt ingeruje w optyczną przestrzeń pracy.

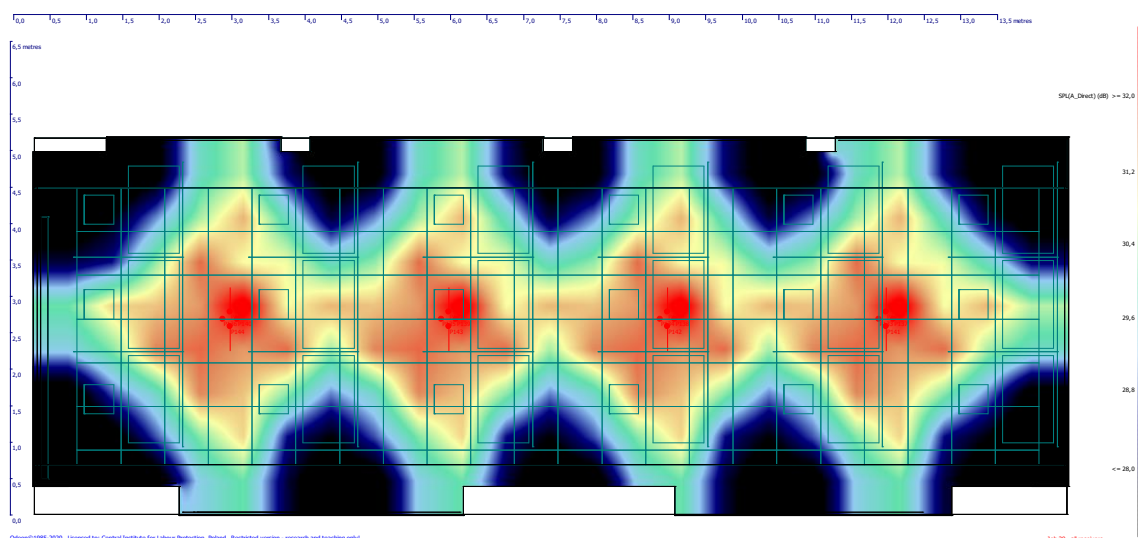
Dlatego w badaniach opisanych w [10, 13, 14] uwzględniono cztery kolumny dźwiękowe w kształcie piramidy o kącie nachylenia ścian bocznych do podstawy 65°. Uzyskano w nich maksymalną różnicę wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max}$ równą 5,7 dB (dla pomieszczenia o kubaturze 210 m³ [13, 14]) i 4,5 dB (dla pomieszczenia o kubaturze 415 m³ [10]), a odchylenie standardowe poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $S_{d,Lp,A,mask}$ równe odpowiednio 1,1 dB i 1,0 dB. (Mniejsza równomierność nagłośnienia w mniejszym pomieszczeniu wynika m. in. z większej nierównomierności chłonności akustycznej w pomieszczeniu). Wyniki te należy uznać za satysfakcjonujące, potwierdzające tezę o możliwości ograniczenia liczby źródeł maskujących (w postaci pojedynczych głośników w suficie podwieszanym), poprzez zastosowanie kolumn dźwiękowych czterogłośnikowych (z głośnikami o zredukowanej mocy elektrycznej i o zredukowanych wymiarach). Podobnie jak podano wyżej (dla liczby ponad stu źródeł dźwięku maskującego w postaci pojedynczych głośników), dla źródeł w postaci kolumn dźwiękowych nie można się spodziewać jednakowych wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w całym obszarze pracy pomieszczenia.

Na Rys. 4 pokazano obliczone wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w ok. 200 punktach obserwacji w obszarze pracy pomieszczenia (dźwięk maskujący emitowany był przez 4 źródła w postaci kolumn dźwiękowych w kształcie piramid umieszczonych w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym).

Na Rys. 5a przedstawiono rozkłady poziomu dźwięku A dźwięku maskującego dla 4 kolumn dźwiękowych w kształcie piramid pochodzące tylko od fali bezpośredniej, a na Rys. 5b pochodzące od fali bezpośredniej i fal odbitych. Wyraźnie widać, że rozmieszczenie równomierne źródeł dźwięku (kolumn dźwiękowych) skutkuje pewną symetrią nagłośnienia tylko dla fali bezpośredniej (Rys. 5a). Można także zauważyć główne kierunki emisji dźwięku z głośników w kolumnach dźwiękowych.



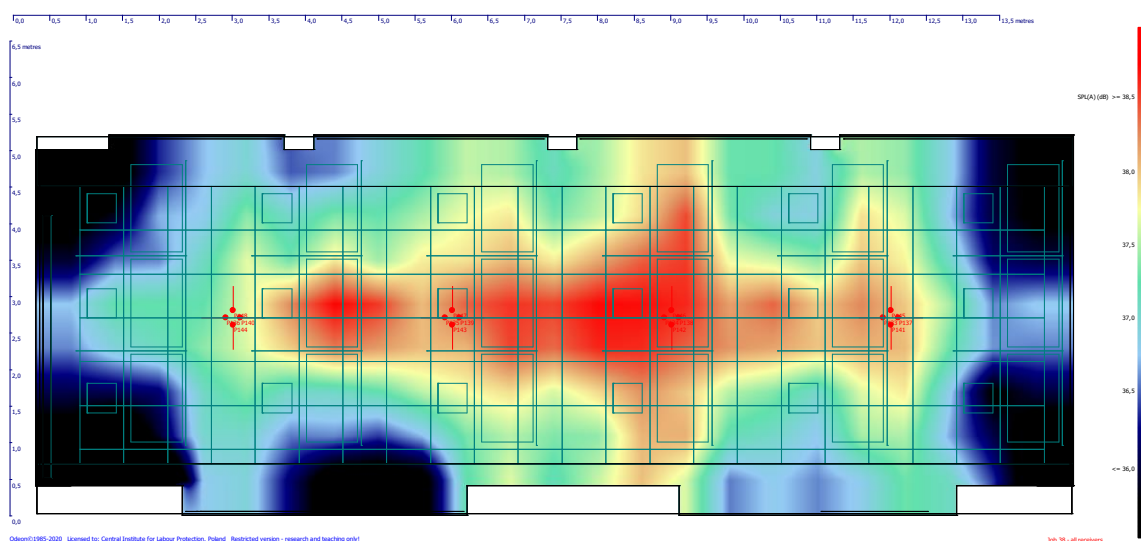
Rys. 4. Poziomy dźwięk A dźwięku maskującego w ok 200 punktach obliczeniowych w obszarze pracy (dźwięk maskujący emitowany jest przez 4 źródła w postaci kolumn dźwiękowych w kształcie piramid, umieszczonych w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym; maksymalna różnica wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy $\Delta L_{p,A,mask,max} = 5,7$ dB) (Wykonano programem ODEON).



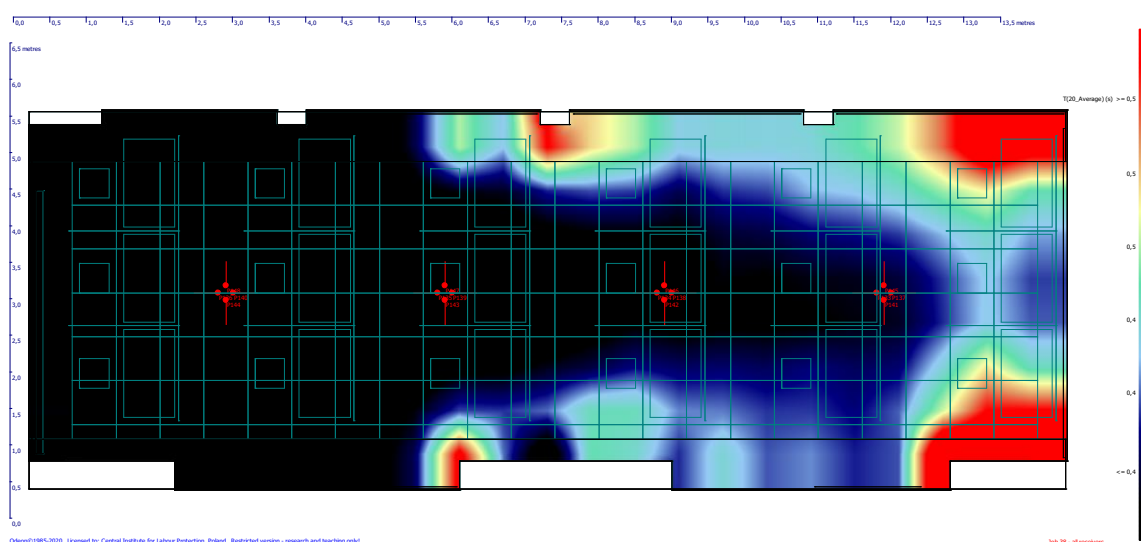
Rys. 5a. Wyniki obliczeń w obszarze pracy rozkładu poziomu dźwięku A dźwięku maskującego tylko od fali bieżącej (nagłośnienia pomieszczenia 4 kolumnami dźwiękowymi w kształcie piramid).

Jednakowa emisja dźwięku ze źródeł (Rys. 5a), nie powoduje jednakowego w charakterze nagłośnienia (emisja) obszaru pracy (Rys. 5b). Wynika to z faktu, że na wypadkową imisję dźwięku (Rys. 5b) mają wpływ tzw. dźwięki pogłosowe (tj. dźwięki, które emitowane były przez źródła dźwięku, a następnie podczas propagacji do obszaru imisji wielokrotnie odbijały się od różnych powierzchni (w tym ścian, sufitu i podłogi pomieszczenia oraz wyposażenia pomieszczenia)). Wyraźnie na Rys. 5b można zauważyć różnicę w równomierności nagłośnienia lewej i prawej części pomieszczenia. Jest ona wynikiem niejednorodnego pola akustycznego w pomieszczeniu, wynikającego z dużej

i nierównomiernej chłonności akustycznej różnych części pomieszczenia. Efekt ten można zaobserwować pośrednio na szacunkowym rozkładzie wartości czasu pogłosu pomieszczenia (Rys. 5c).



Rys. 5b. Wyniki obliczeń w obszarze pracy rozkładu poziomu dźwięku A dźwięku maskującego wypadkowego (nagłośnienia pomieszczenia 4 kolumnami dźwiękowymi w kształcie piramid).



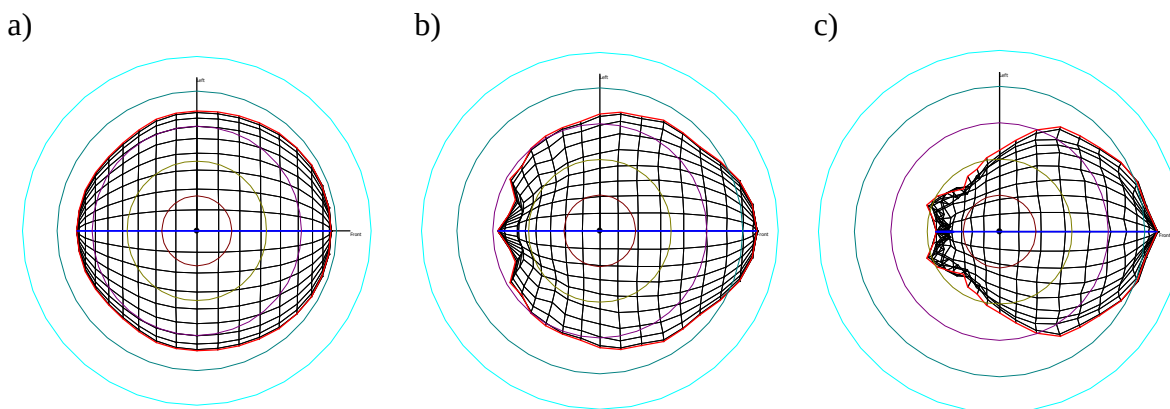
Rys. 5c. Wyniki obliczeń w obszarze pracy czasu pogłosu (Wykonano programem ODEON).

3.3. Wymagane widmo częstotliwościowe poziomu mocy akustycznej zastosowanych głośników w źródłach dźwięku maskującego w postaci kolumn

W podrozdziale 3.1 (analogicznie jak w [9]) podano wymagane widmo częstotliwościowe skutecznego dźwięku maskującego. Wynika z niego, że w obszarze pracy, na stanowiskach pracy (emisja), widmo dźwięku maskującego powinno mieć charakter szumu różowego. Ponieważ na wypadkowe widmo dźwięku maskującego na stanowiskach pracy, poza źródłami maskującymi będą miały także wpływ właściwości akustyczne pomieszczenia

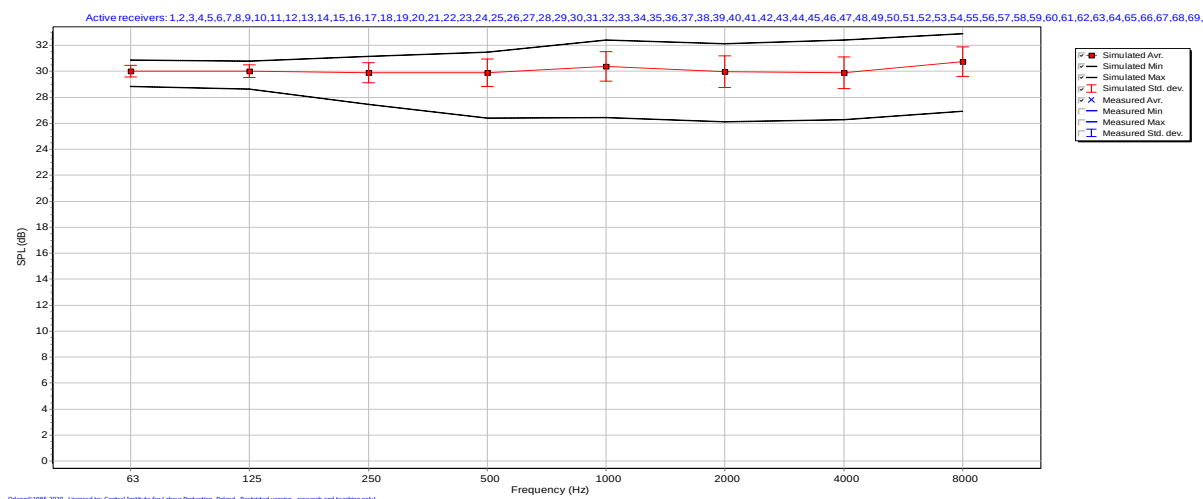
oraz tłumienie dźwięku w powietrzu, to jest oczywiste, że aby uzyskać dźwięk maskujący na stanowiskach pracy (emisja) w postaci szumu różowego, widmo poziomu mocy akustycznej (emisja) nie może mieć dokładnie charakteru szumu różowego. W analizie tego zjawiska konieczne jest uwzględnienie charakterystyk kierunkowości rozpatrywanych głośników. W symulacjach obliczeniowych, maksymalnie zbliżonych do warunków rzeczywistych, chodzi więc o określenie wymaganego poziomu i widma mocy akustycznej źródeł maskujących, przy zadanych charakterystykach emisji głośników zastosowanych w kolumnach dźwiękowych oraz uwzględnieniu wszystkich efektów propagacji dźwięku (w tym odbić fal akustycznych). W analizie należy uwzględnić także liczbę źródeł oraz określić położenie punktu/punktów odniesienia (imisji), w którym/których widmo poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku maskującego ma mieć charakter szumu różowego.

Analizę przeprowadzono dla pomieszczenia o kubaturze 210 m^3 . W pomieszczeniu, w suficie podwieszanym, uwzględniono cztery kolumny dźwiękowe w kształcie piramid zawierające zestawy czterogłośnikowe. Kąt ściany bocznej piramidy do podstawy (a więc i sufitu podwieszanego) wynosił 65° . W badaniach uwzględniono dane techniczne głośników firmy CES_Audio typ muh-6300.cf1 (dane w bazie CLF). Wybrane charakterystyki kierunkowe w płaszczyźnie poziomej dla trzech częstotliwości podano na Rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyki kierunkowe w płaszczyźnie poziomej głośnika uwzględnionego w symulacji dla częstotliwości: 250, 1000 i 4000 Hz (Koncentryczne linie skali co 10 dB) (Wykonano programem i wg danych ODEON dla głośnika CES_Audio/muh-6300.cf1).

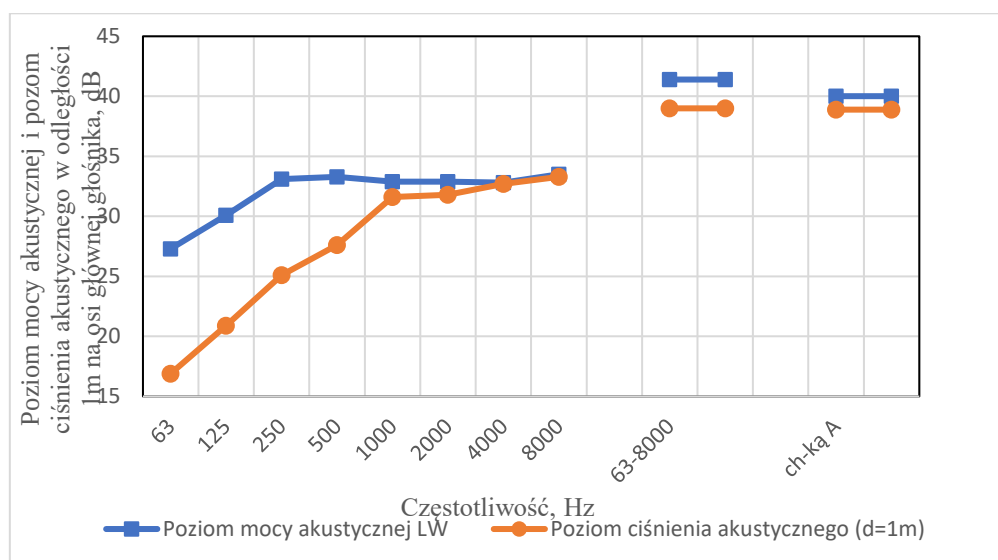
W badaniu uwzględniono zamiast jednego punktu odniesienia, średnie w obszarze pracy widmo częstotliwościowe dźwięku maskującego (z około 200 punktów obliczeniowych). Na Rys. 7 podano wyniki symulacji tj. średnie w obszarze pracy widmo poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku maskującego w oktawowych pasmach częstotliwości, już po odpowiednio dobranym widmie poziomu mocy akustycznej uwzględnionych w kolumnach dźwiękowych głośnikach. Jak można zauważyć średnie widmo dźwięku maskującego w obszarze pracy ma charakter szumu różowego.



Rys. 7. Wyniki obliczeń średniego w obszarze pracy (z ok 200 punktów obliczeniowych) widma dźwięku maskującego - poziomu ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości (wytworzonego w pomieszczeniu o kubaturze 210 m³ przez cztery czterogłośnikowe kolumny dźwiękowe o kształcie piramid) (Wykonano programem ODEON).

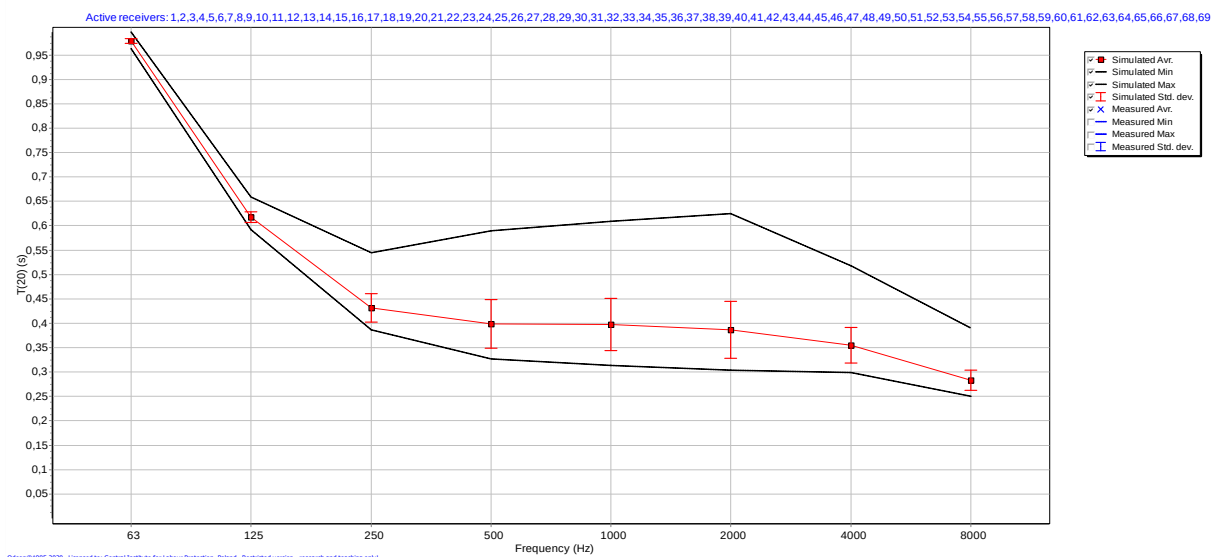
Widmo poziomu mocy akustycznej pojedynczego głośnika podano na Rys. 8. Znacząco ono odbiega charakterem, od widma szumu różowego, szczególnie w zakresie poniżej 250 Hz. Na tym rysunku pokazano także widmo poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku bezpośredniego określone na osi głównej głośnika w odległości 1 m.

Konieczność obniżenia poziomu mocy akustycznej źródła (emisja) w zakresie niskich częstotliwości, wynika z konieczności uzyskania w obszarze pracy widma o charakterze szumu różowego oraz tego, że pomieszczenie w zakresie częstotliwości poniżej 250 Hz znacznie mniej tłumi dźwięki odbite niż w zakresie wyższych częstotliwości.



Rys. 8. Poziom mocy akustycznej i poziom ciśnienia akustycznego w odległości 1 m na osi głównej głośnika, zastosowanego w czterech kolumnach dźwiękowych w kształcie piramid w symulacji nagłośnienia pomieszczenia o kubaturze 210 m³.

Niejednakowe właściwości akustyczne pomieszczenia, w różnych zakresach częstotliwości, można zaobserwować na Rys. 9, na którym pokazano średni w całym obszarze pracy czas pogłosu pomieszczenia. Właściwość tą można wykorzystać stosując w systemie maskującym głośniki o nieco gorszych parametrach w zakresie niskich częstotliwości (głośniki o mniejszej średnicy).



Rys. 9. Średni w obszarze pracy czas pogłosu pomieszczenia (Wykonano programem i wg danych ODEON).

4. PODSUMOWANIE

W artykule rozpatrywano trzy aspekty dotyczące nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia biurowego open space. Określono minimalny (30 dB) i maksymalny (37 dB) poziom dźwięku A dźwięku o widmie szumu różowego, skutecznie maskującego niepożądane dźwięki mowy w biurowych pomieszczeniach open space. Z tego wynika, że maksymalna różnica wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy nie może przekraczać wartości 7 dB. Analiza wyników symulacji komputerowej, z wykorzystaniem programu ODEON, umożliwiła także określenie dopuszczalnego odchylenia standardowego poziomu dźwięku A w obszarze pracy pomieszczenia równego 1,5 dB. Analiza obliczeniowa na przykładzie dwóch pomieszczeń biurowych open space pozwoliła określić minimalną liczbę źródeł dźwięku maskującego (w postaci pojedynczych głośników umieszczonych w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym), spełniających ww. kryteria, na równą 8-9 (pomieszczenie o kubaturze 210 m³) i 12 (pomieszczenie o kubaturze 210 m³). Z trzech układów źródeł (dla pomieszczenia o kubaturze 210 m³): 8 źródeł dźwięku w jednej linii, 8 źródeł dźwięku w dwóch liniach po 4 oraz 9 źródeł dźwięku w trzech liniach po 3, uzyskano największą równomierność nagłośnienia pomieszczenia dla tego drugiego układu (maksymalna

różnica wartości poziom dźwięku A dźwięku maskującego w obszarze pracy wynosiła 5,7 dB). Zamiast stosować 8-9 lub 12 głośników umieszczonych w suficie, można uzyskać taką samą równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym, w obszarze pracy pomieszczenia, stosując cztery czterogłośnikowe kolumny dźwiękowe. W każdej kolumnie są cztery głośniki o znacznie mniejszych wymiarach i mniejszej mocy elektrycznej. Można wówczas także ograniczyć instalację systemu zasilającego głośniki. W celu uzyskania w obszarze pracy pomieszczenia dźwięku o charakterze widma szumu różowego, konieczne jest zapewnienie odpowiedniego poziomu i widma częstotliwościowego poziomu mocy głośników. Widmo to będzie odbiegało od charakteru widma szumu różowego (które należy zapewnić w obszarze pracy), ponieważ będzie musiało uwzględniać skompensowanie wpływu nie wszechkierunkowej emisji dźwięku z rzeczywistego źródła/głośnika oraz wpływ niejednakowych właściwości pomieszczenia dla różnych częstotliwości (w szczególności w zakresie niepłaskich charakterystyk częstotliwościowych: współczynników pochłaniania dźwięku elementów ograniczających pomieszczenie oraz chłonności akustycznej wyposażenia). Z przeprowadzonych badań wynika, że dla uwzględnionego w symulacji głośnika, konieczne jest ograniczenie jego poziomu mocy akustycznej w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 250 Hz), co jest korzystnym zjawiskiem, gdyż można wówczas jako głośniki maskujące zastosować głośniki o mniejszych wymiarach oraz mniejszej mocy elektrycznej.

5. PODZIĘKOWANIA

Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej. (Zadanie nr 2.SP.05 pt. *Opracowanie źródła dźwięku maskującego hałas związany z komunikacją werbalną w biurowych pomieszczeniach wieloprzestrzennych*). Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

6. LITERATURA

1. Khaled Ismail, Sound Masking in the Office and It's Benefits. HSSE WORLD, <https://hsseworld.com/sound-masking-in-the-office-and-its-benefits/> (Dostęp 20.12.2021)
2. Hongisto V. O., Effect of sound masking on workers in an open office. Konferencja EURONOISE, 29 czerwca – 4 lipca 2008, Paris
3. PN EN ISO 3382-3:2012: Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 3: Pomieszczenia biurowe typu “open space”. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012

4. PN-B-02151-4:2015, Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2015
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2017 poz. 2285) (wejście w życie 1.01.2018)
6. Pleban D. (red.), Occupational noise and workplace acoustics, Advances in Measurement and Assessment techniques, Chapter 7 Studies on acoustic properties of open-plan office rooms, (autor rozdziału Mikulski W.). CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York 2021: 173-220. <https://www.routledge.com/Occupational-Noise-and-Workplace-Acoustics-Advances-in-Measurement-and-Pleban/p/book/9780367499259>. 21.09.2020 (Dostęp 20.12.2021)
7. ODEON Room Acoustics Software, <https://odeon.dk/product/what-is-odeon/> (Dostęp 20.12.2021).
8. Mikulski W., Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – zastosowanie środków technicznych w typowym pomieszczeniu [Acoustic conditions in open plan office – Application of technical measures in a typical room]. Med. Pr. 2018; 69(2): 153–165, DOI: <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00574> (Dostęp 20.12.2021)
9. Mikulski W., Wpływ dźwięku maskującego zrozumiałość mowy na środowisko akustyczne w biurach typu open space – wyniki badań własnych [The impact of sounds masking speech intelligibility on acoustic environment in open plan offices]. Bezpiecz. Pr. Nauka Prakt. 2020; 12: 22–26, DOI: 10.5604/01.3001.0014.5757 (Dostęp 20.12.2021)
10. Mikulski W., Swidziński A., Masking sound distribution in open plan office room – case study base on simulation, Konferencja 27th International Congress on Sound and Vibration ICSV27, 11–16 lipiec 2021, Praha
11. Edgington C., Stevens M., Practical considerations and experiences with sound masking's latest technology. Konferencja 24th International Congress on Sound and Vibration, 23-27 lipiec 2017, London, Great Britain,
12. Mikulski W., Rozkład poziomego dźwięku maskującego w pomieszczeniu biurowym open space, Rozdział nr 2 w Postępy Akustyki, Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie, Kraków 2021, ISBN: 978-83-61402-02-2 str. 15-23; file:///C:/Users/User/Desktop/_2021%20main/publikacje%202021/osa%20postepy%20akustyki%20%202021/postepy_akustyki_2021.pdf (Dostęp 20.12.2021)

13. Mikulski W., Maskowanie dźwięku w wieloprzestrzennych pomieszczeniach biurowych open space. Zastosowanie kolumn dźwiękowych w kształcie piramidy jako źródła dźwięku maskującego. Case study na podstawie badań pomiarowych. Medycyna Pracy (w redakcji 2022 r)
14. Mikulski W., Appliance of sound masking sources in the shape of pyramids in acoustic system of an office room - measurement results, Konferencja 28th International Congress on Sound and Vibration ICSV28, 24-28 lipiec 2022, Singapore (w redakcji)
15. PN-B-02151-2:2018, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2018.

WYPADKOWA IZOLACYJNOŚĆ AKUSTYCZNA LEKKIEJ SZKIELETOWEJ ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ Z OKNEM

Jacek Nurzyński
Instytut Techniki Budowlanej

1. WPROWADZENIE

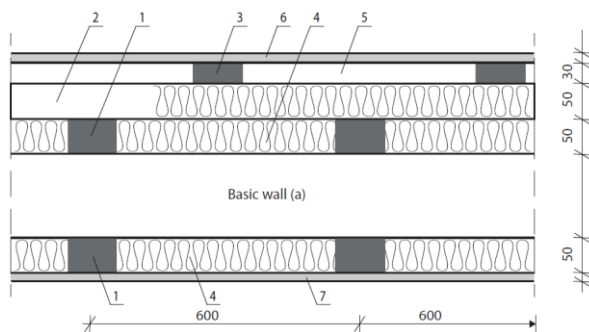
Lekkie budynki mieszkalne o prefabrykowanej konstrukcji szkieletowej są coraz bardziej rozpowszechnione. Mają wiele zalet związanych z samym procesem realizacyjnym, wykorzystaniem ekologicznych materiałów, oszczędnością energii, a ponadto są spójne z ideą zrównoważonego rozwoju oraz mogą zapewnić użytkownikom wysoki komfort [1]. Jednym z istotnych czynników kształtujących jakość użytkową tego typu budynków są ich właściwości akustyczne, a w szczególności parametry ściany zewnętrznej, dające odpowiednią ochronę przed hałasem środowiskowym. Izolacyjność akustyczna całej fasady powinna być dostosowana do warunków panujących w najbliższym otoczeniu. Zasadniczo jest ona zdeterminowana izolacyjnością elementów składowych ściany, do których należy przede wszystkim część nieprzezierna oraz okna. Właściwości akustyczne obu tych elementów, traktowanych jako odrębne wyroby budowlane, są już stosunkowo dobrze rozpoznane, istnieje na ten temat bogata literatura. Trudno jest natomiast znaleźć publikacje odnoszące się do izolacyjności całej, złożonej fasady oraz rzeczywistego udziału jej poszczególnych składników. Okno zamontowane w ścianie o lekkiej konstrukcji wpływa w pewnym stopniu na jej schemat statyczny, oba połączone ze sobą elementy mogą więc na siebie wzajemnie oddziaływać. Powstaje zatem pytanie, czy właściwości akustyczne całej przegrody są prostą wypadkową właściwości jej komponentów. Ponadto charakterystyki widmowe izolacyjności akustycznej właściwej nieprzeziernej części ściany oraz okna mają zasadniczo różny przebieg, ich wpływ będzie się więc zaznaczał w różnych zakresach częstotliwości. Kolejne pytanie dotyczy zatem możliwości wykonywania wiarygodnych obliczeń we wskaźnikach jednoliczbowych.

W referacie przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dwóch wariantów części pełnej ściany, trzech okien o różnym oszkleniu oraz kompletnych ścian złożonych z części pełnej oraz okna. Wyniki badań zostały porównane z wynikami obliczeń, wykonanych w poszczególnych pasmach częstotliwości i bezpośrednio we wskaźnikach jednoliczbowych. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą być przydatne podczas projektowania lekkich ścian zewnętrznych w zakresie ich właściwości akustycznych, a także do kierunkowania dalszych prac badawczych dotyczących parametrów akustycznych tego typu konstrukcji.

2. CZĘŚĆ PEŁNA ŚCIANY

Badania obejmowały dwie konstrukcje ścienne reprezentujące dwie grupy rozwiązań występujących najczęściej w praktyce. W obu przypadkach zasadniczym elementem nośnym była ściana podstawowa o szkieletowej konstrukcji drewnianej, złożona ze słupków o przekroju 180x60 mm w rozstawie 600 mm oraz takich samych elementów obwodowych. Obustronna okładzina była wykonana z pojedynczych płyt gipsowo-kartonowych o grubości 12,5 mm mocowanych bezpośrednio do szkieletu. Wnętrze ściany zostało wypełnione materiałem dźwiękochłonnym w postaci wełny mineralnej. Ściana podstawowa stanowiła podwójny ustrój rezonansowy, w którym wyraźnie zaznaczała się częstotliwość układu masa-sprężyna-masa, występująca w zakresie niskich częstotliwości. Jej położenie było zdeterminowane masą płyt okładzinowych oraz ich odległością wynikającą z grubości szkieletu. Drugim punktem charakterystycznym była częstotliwość koincydencji występująca w pasmach wysokich, związana z parametrami samych płyt okładzinowych (Rys. 2).

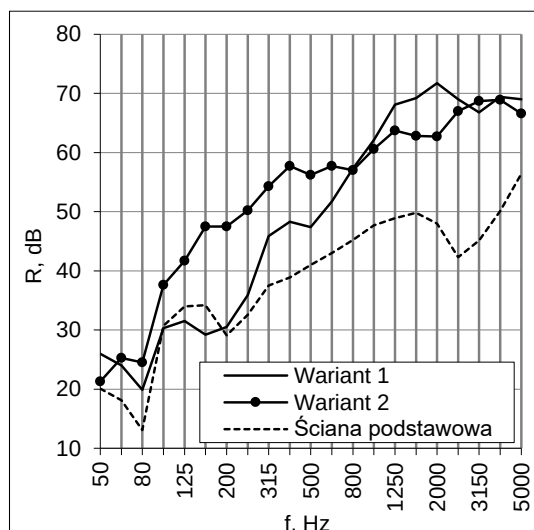
Do ściany podstawowej, po jej stronie wewnętrznej, została zamocowana ścianka instalacyjna oparta na pionowych łątach przytwierdzonych sztywno do głównego szkieletu, wyposażona w okładzinę z płyt gipsowo-kartonowych oraz wypełnienie z wełny mineralnej. Po stronie zewnętrznej zamontowano izolację termiczną systemu ETICS (wariant 1), lub izolację z przestrzenią wentylacyjną, opartą na drewnianym szkielecie złożonym z listew ułożonych prostopadłe w trzech płaszczyznach (Rys. 1).



Rys. 1. Część pełna lekkiej ściany zewnętrznej z dodatkowymi warstwami izolacyjnymi

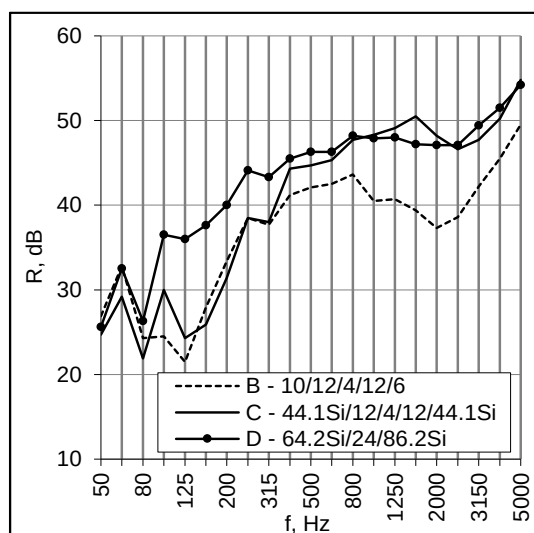
Wyniki badań izolacyjności akustycznej obu wariantów pełnej części ściany przedstawiono na Rys. 2. Wykresy różnią się w sposób zasadniczy szczególnie w zakresie częstotliwości średnich. Wariant z izolacją termiczną typu ETICS, złożoną z twardej wełny mineralnej o grubości 100 mm i nałożonego na nią cienkiego tynku, wykazywał znacznie słabsze

właściwości akustyczne ze względu na rezonansowy charakter ustroju izolacyjnego. Jednoliczbowe wskaźniki $R_{A2} = R_w + C_{tr}$ wynosiły odpowiednio 42 dB i 54 dB. Oba rozpatrywane warianty reprezentują bardzo szeroką gamę rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w praktyce [2]. Izolacyjność akustyczna ścian szkieletowych z ociepleniem typu ETICS, wyrażona wskaźnikiem R_{A2} , jest zwykle na poziomie ok. 40 dB [3]. W przypadku ocieplenia z przestrzenią wentylacyjną wartość ta może osiągać ok. 50 dB.



Rys. 2. Izolacyjność akustyczna części pełnej ściany zewnętrznej, wyniki badań laboratoryjnych

akustyczną 44.1Si, 66.2Si, 86.2Si umieszczonych w odstępach 12 lub 24 mm. Parametry te są wyszczególnione w opisie próbek. Wyniki badań izolacyjności samych okien zamieszczono na



Rys. 3. Izolacyjność akustyczna okien, wyniki badań laboratoryjnych

głównie od masy powierzchniowej szyb zewnętrznych oraz występującej pomiędzy nimi odległości. W pasmach wysokich występuje efekt koincydencji, znacznie złagodzony w przypadku szyb laminowanych folią akustyczną.

4. ŚCIANA Z OKNEM

Przeprowadzono badania sześciu ścian stanowiących różne kombinacje omawianych wcześniej elementów nieprzeziernych oraz okien (Rys. 4). W elementach pełnych wykonano otwór, w którym montowano kolejne okna. Został przy tym usunięty fragment szkieletu oraz część okładzin i dodatkowych warstw izolacyjnych, co w pewnym stopniu zmieniło schemat

3. OKNA

Do analizy wytypowano trzy jednoskrzydłowe okna PVC należące do tego samego systemu, mające takie same wymiary lecz wyposażone w różne oszklenie:

B – dwukomorowe 10/12/4/12/6

C – dwukomorowe 44.1Si/12/4/12/44.1Si

D – jednokomorowe 66.2Si/24/86.2Si

Oszklenie było zbudowane z monolitycznych szyb o grubości 4, 6, 10 mm, oraz szyb laminowanych folią

Rys. 3. Charakterystyki widmowe są w znacznym stopniu zróżnicowane w zależności od zastosowanego oszklenia. Generalnie rozpatrywane okna charakteryzują się dobrymi lub bardzo dobrymi właściwościami akustycznym, reprezentują szeroki zakres parametrów występujących w praktyce w przypadku standardowych okien jednoramowych. W pasmach niskich widoczny jest rezonans wynikający z płytowego układu oszklenia, którego położenie jest zależne

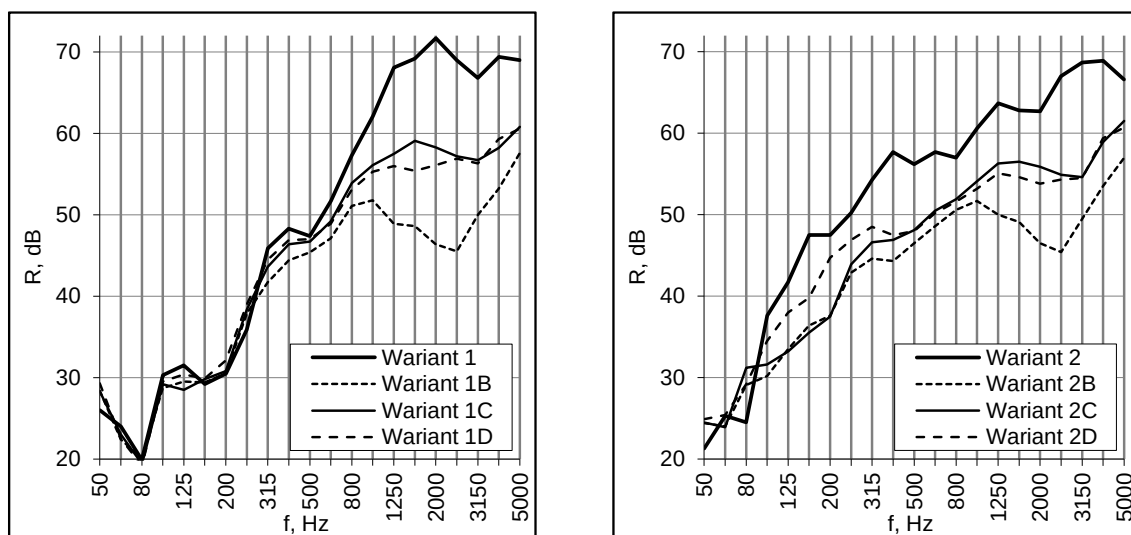
konstrukcyjny ściany. Sposób montażu i uszczelnienia okien był zgodny z rzeczywistą praktyką budowlaną.



Rys. 4. Lekka ściana szkieletowa z oknem zamontowana na stanowisku badawczym ITB.

Wyniki badań obu ścian z trzema kolejnymi oknami przedstawiono na Rys. 5. W wariancie pierwszym wpływ okien na wypadkową izolacyjność akustyczną całej ściany zaznaczał się przede wszystkim w pasmach wysokich, powyżej 800 Hz. Natomiast w pasmach niskich, do 250 Hz, ściana z oknem miała w zasadzie takie same właściwości akustyczne jak jej część nieprzezierna.

W wariancie 1 wartości wskaźnika jednoliczbowego R_{A2} mieściły się w granicach 41 – 42 dB, były więc praktycznie takie same, jak dla samej części pełnej (obniżenie o 1 dB występowało dla okien B i C). Znaczny spadek izolacyjności w pasmach wysokich nie miał więc istotnego wpływu na wartości jednoliczbowe. Należy zwrócić uwagę, że końcowy efekt wyrażony wskaźnikiem R_{A2} jest we wszystkich przypadkach niemal jednakowy, co wskazuje na zasadność optymalizacji parametrów akustycznych poszczególnych elementów fasady.



Rys. 5. Wyniki badań lekkich ścian szkieletowych (Wariant 1 i Wariant 2) z oknem B, C i D.

W wariancie drugim obniżenie izolacyjności akustycznej po zastosowaniu okien obejmowało już znacznie szerszy zakres częstotliwości. Wskaźnik jednoliczbowy R_{A2} ściany z oknem znajdował się w zakresie 44 – 48 dB, był więc niższy o 6 – 10 dB od wartości

uzyskanej przez samą część pełną ściany. Pomimo pewnych różnic, także w tym przypadku jest celowa optymalizacja doboru poszczególnych elementów fasady.

Obliczenia wypadkowej izolacyjności akustycznej zostały wykonane wg wzoru (1),

$$R = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{-0,1R_i} \right) \quad (1)$$

w którym S_i oraz R_i są odpowiednio polem powierzchni, m^2 , oraz izolacyjnością akustyczną właściwą, dB, poszczególnych elementów składowych ściany tj. części pełnej i okna. Wyniki obliczeń przeprowadzonych w poszczególnych pasmach częstotliwości wykazały bardzo dobrą zgodność z wynikami bezpośrednich pomiarów laboratoryjnych. Należy więc wnioskować, że pod względem akustycznym ściana szkieletowa i zamontowane w niej okno funkcjonują niezależnie i znacząco na siebie nie oddziałują. W inżynierskich obliczeniach kompletna fasada może być traktowana jako proste złożenie obu tych elementów.

W przypadku obliczeń wykonanych bezpośrednio we wskaźnikach jednoliczbowych również uzyskano zaskakująco dobrą zgodność z wynikami pomiarów, pomimo bardzo wyraźnych różnic w przebiegu charakterystyk widmowych. We wszystkich przypadkach, z wyjątkiem wariantu 2D, różnice pomiędzy zmierzonymi a obliczonymi wartościami wskaźnika R_{A2} mieściły się w granicach $\pm 0,7$ dB. W przypadku pozostałych wskaźników, R_w oraz $R_{A1} = R_w + C$, różnice te były jeszcze mniejsze, nie przekraczały 0,4 dB. Oznacza to, że przy prognozowaniu parametrów akustycznych lekkiej ściany zewnętrznej można stosować uproszczone obliczenia, przyjmując jako dane wejściowe wartości jednoliczbowe. W wariancie 2D zmierzona wartość wskaźnika R_{A2} była o 2,7 dB mniejsza od obliczonej, różnica ta mogła jednak wynikać z błędów montażowych.

7. PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono wyniki badań izolacyjności akustycznej pełnej części ściany zewnętrznej, okien, oraz kompletnej fasady złożonej z kolejnych kombinacji części pełnej i okna. W wariancie pierwszym wpływ okien na wypadkową izolacyjność akustyczną całej ściany zaznaczał się jedynie w pasmach wysokich, powyżej 800 Hz. Wartość wskaźnika R_{A2} mieściła się w granicach 41 – 42 dB zarówno dla ściany z oknem jak i bez okna. Końcowy efekt był więc praktycznie taki sam, co wskazuje na zasadność optymalizacji przy projektowaniu ściany. W wariancie drugim obniżenie izolacyjności akustycznej obejmowało szerszy zakres częstotliwości, wskaźnik jednoliczbowy R_{A2} był niższy o 6 – 10 dB od wartości uzyskanej przez samą część pełną ściany. Wyniki obliczeń wykonanych wg wzoru (1) wykazywały dobrą zgodność z wynikami badań eksperymentalnych. Oznacza to, że parametry akustyczne lekkiej

ściany zewnętrznej można prognozować na podstawie wartości jednoliczbowych. Jedynie w wariancie 2D zmierzona wartość wskaźnika R_{A2} była wyraźnie mniejsza od obliczonej, jednak różnica ta mogła wynikać z błędów montażowych.

6. LITERATURA

1. Šujanová P., Rychtáriková M., Mayor T. S., Hyder A., A Healthy, Energy-Efficient and Comfortable Indoor Environment, a Review. *Energies* 2019;14:14.
2. Caniato M., Bettarello F., Ferluga A., Marsich L., Schmid C., Fausti P., Acoustic of lightweight timber buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;80:585–96. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110>.
3. Nurzyński J., Sound insulation of lightweight external frame walls and the acoustic effect of additional thermal insulation. *Appl Acoust.* 2022;190. doi:10.1016/j.apacoust.2022.108645

STANOWISKO LABORATORYJNE DO ODTWARZANIA HAŁASU TURBIN WIATROWYCH

Dariusz PLEBAN, Grzegorz SZCZEPAŃSKI, Jan RADOSZ, Leszek MORZYŃSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
e-mail: daple@ciop.pl

1. WPROWADZENIE

Wzrost zapotrzebowania na energię został spowodowany rewolucją naukowo-techniczną, która dodatkowo zbiegła się z 3,2-krotnym wzrostem populacji w latach 1850-1970. W okresie tym całkowita konsumpcja energii zwiększyła się aż 12-krotnie. W przemyśle wzrost ten był jeszcze większy, bo ponad 20-krotny [1]. Przez ostatnie 40 lat tendencja ta trochę osłabła, ale nadal wykazywała charakter wykładniczy (218 EJ w 1970 r., 301 EJ w 1980 r., 347 EJ w 1990 r. i 426 EJ w 2001 r.). Według prognoz na najbliższe lata zapotrzebowanie na energię wyniesie 657 EJ w 2025 r. [1].

Wyżej wspomniany systematyczny wzrost zapotrzebowania na energię, jak również towarzyszący temu wzrost zanieczyszczeń środowiska będący skutkiem stosowania głównie paliw kopalnych, spowodował wzrost wykorzystania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Jednocześnie regulacje Unii Europejskiej w zakresie polityki energetyczno-środowiskowej i wdrażające je przepisy prawa krajowego wpływają na system elektroenergetyczny, a w szczególności na źródła wytwarzania energii elektrycznej. Obowiązująca w Polsce Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii [2], wdrażająca dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych [3] skutkuje zwiększeniem inwestycji w pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych. Źródła te obejmują zasadniczo wodę, wiatr, biomasę, promieniowanie słoneczne, rozpad izotopów i grawitację.

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego z 2021 r. [4] udział energii ze źródeł odnawialnych w pozyskaniu energii pierwotnej ogółem wzrósł 19,74% w 2019 r. do 21,60% w 2020 r. Energia pozyskana ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2020 r. pochodziła w przeważającym stopniu z biopaliw stałych (71,61%), energii wiatru (10,85%) i z biopaliw ciekłych (7,79%). Łączna wartość energetyczna pozyskanej energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2020 r. wyniosła 524 113 TJ.

Korzystanie z drugiego spośród ww. źródeł energii, tj. energii wiatru wywołuje stale szereg pytań z zakresu oddziaływania farm wiatrowych na człowieka. Oddziaływanie to obejmuje wiele czynników związanych z funkcjonowaniem farm wiatrowych,

a w szczególności hałas emitowany przez te farmy. W związku z tym zagadnienie oddziaływania hałasu farm wiatrowych na człowieka jest tematem licznych prac naukowych. W literaturze można spotkać wiele doniesień na temat skutków tego hałasu u osób funkcjonujących i/lub żyjących w pobliżu farm wiatrowych. Przykładami takich badań są wyniki zawarte między innymi w [5-15].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie opracowanego stanowiska badawczego do odtwarzania hałasu turbin wiatrowych w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko to wykorzystywane jest do prowadzenia w warunkach laboratoryjnych badań uciążliwości hałasów różnych typów turbin wiatrowych.

2. STANOWISKO LABORATORYJNE

Stanowisko laboratoryjne do odtwarzania hałasu turbin wiatrowych zestawiono w komorze akustycznej CIOP-PIB (Rys. 1).



Rys. 8. Komora do badań akustycznych CIOP-PIB

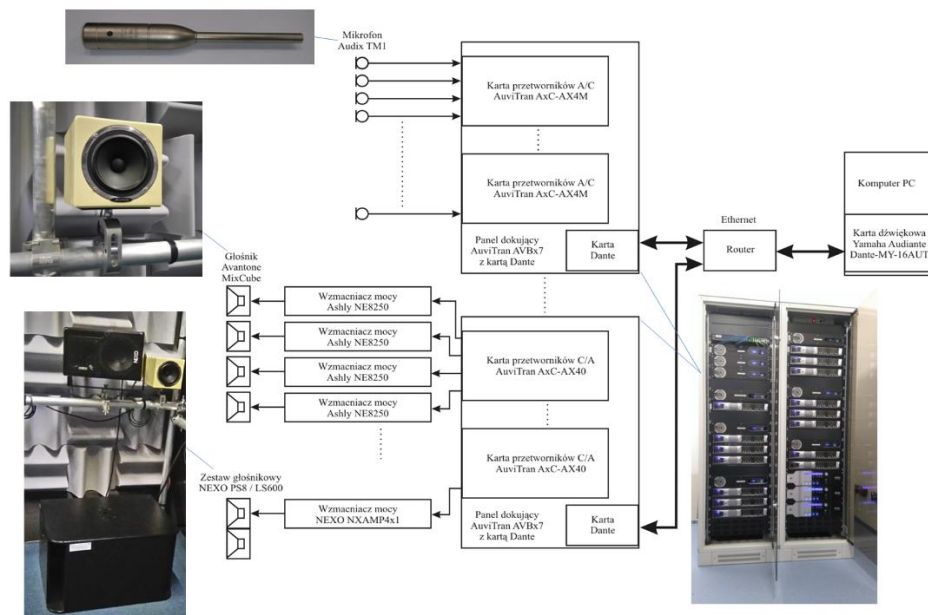
Komora do badań akustycznych jest pomieszczeniem typu „box in a box” o dużej izolacyjności akustycznej. Pomieszczenie zewnętrzne jest wykonane z żelbetonu o grubości 240 mm. Pomieszczenie wewnętrzne ma ściany wykonane z bloczków silikatowych w ramie żelbetowej posadowionych na wibroizolatorach. Pomiędzy ścianami pomieszczeń znajduje się warstwa wełny mineralnej. Podłoga komory jest podłogą pływającą składającą się z płyty żelbetowej na wibroizolatorach oraz umieszczonej na niej podłogi drewnianej na legarach, pomiędzy którymi znajduje się wełna mineralna. Podłoga pokryta jest wykładziną. Sufit pomieszczenia ma konstrukcję samonośną wykonaną z wielu warstw płyt MFP i gipsowo-

kartonowych rozdzielonych przestrzeni wypełnioną wełną mineralną. Ściany pomieszczenia wewnętrznego oraz sufit pokryte są ustrojami pochłaniającymi zbudowanymi w oparciu o dwa rodzaje pianki dźwiękochłonnej uformowanej w kształt klinów. Wymiary wewnętrzne komory przed adaptacją akustyczną wynoszą (długość x szerokość x wysokość) 14,28 x 5,1 x 5,5 m, natomiast po adaptacji 13,5 x 4,4 x 5,0 m. Kubatura pomieszczenia bez i z adaptacją akustyczną to odpowiednio 400 i 297 m³.

Komora do badań akustycznych została zaprojektowana głównie z myślą o prowadzeniu w niej badań dotyczących percepcji dźwięków przez człowieka, z tego względu wyposażenie komory stanowi kratownica z rur o średnicy 50 mm, na której zamocowano łącznie 128 głośników i 80 mikrofonów.

Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi komorę do badań akustycznych są: czas pogłosu oraz poziom tła akustycznego. Średni czas pogłosu dla częstotliwości powyżej 63 Hz nie przekracza 0,2 s. Natomiast poziom dźwięku A tła akustycznego w komorze nie przekracza 20 dB, zaś poziom ciśnienia akustycznego (bez korekcji) jest większy i zawiera się w przedziale od 40 do 45 dB, i wynika z podwyższonych poziomów ciśnienia akustycznego tła akustycznego w zakresie częstotliwości poniżej 63 Hz.

Komora akustyczna jest wyposażona w wielokanałowy system akustyczny, umożliwiający odtwarzanie i pomiary dźwięków w jej wnętrzu. System ten składa się ze 126 głośników (120 głośników Avantone MixCube oraz 6 zestawów głośników Nexo LS600/PS8) i 80 mikrofonów Audix TM1 rozmieszczonych na stelażu z rur aluminiowych o średnicy 50 mm, zamocowanym do ścian komory. Schemat wielokanałowego systemu do odtwarzania i pomiarów dźwięków przedstawiony został na Rys. 2. System ten wykorzystuje sieć DANTE (Digital Audio Network Through Ethernet), w której transmisja cyfrowych sygnałów akustycznych realizowana jest poprzez sieć Ethernet. W skład systemu wchodzi zainstalowana w komputerze karta dźwiękowa Audiante Dante-MY-16AUT, mogąca obsługiwać do 128 kanałów wejściowych i 128 wyjściowych. Wejścia i wyjścia karty dźwiękowej połączone są poprzez sieć Ethernet z kartami przetworników analogowo-cyfrowych (AuviTran AxC-AX4M) i cyfrowo-analogowych (AuviTran AxC-AX40). Czterokanałowe karty przetworników A/C i C/A umieszczone są w panelach dokujących AuviTran AVBx7 (po 6 kart przetworników w jednym panelu). Wejścia kart przetworników A/C połączone są bezpośrednio z mikrofonami pomiarowymi, natomiast wyjścia kart przetworników C/A połączone są ze wzmacniaczami mocy, do których wyjść dołączone są głośniki. Panele dokujące z przetwornikami A/C i CA oraz wzmacniacze mocy zamocowane są w dwóch szafach rack 19".



Rys. 2. Schemat wielokanałowego systemu odtwarzania i pomiarów dźwięków

Prawidłowe odtwarzanie w warunkach laboratoryjnych hałasu turbiny wiatrowej zależy nie tylko od środowiska badawczego (tj. właściwości komory akustycznej), ale także od zastosowanego systemu odtwarzania przestrzennego dźwięków oraz lokalizacji elementów tego systemu. W skład tego systemu odtwarzania przestrzennego dźwięku, bazującego na opisanym wcześniej i przedstawionym na Rys. 2 wielokanałowym systemie akustycznym, wchodzi:

- 16 aktywnych studyjnych monitorów pola bliskiego Avantone MixCube o zakresie przenoszenia od 90 Hz do 17 kHz
- 2 głośniki niskotonowe LS600 o paśmie przenoszenia od 30 Hz do 200 Hz
- 1 laboratoryjne źródło infradźwięków o paśmie przenoszenia od 8 Hz do 70 Hz.

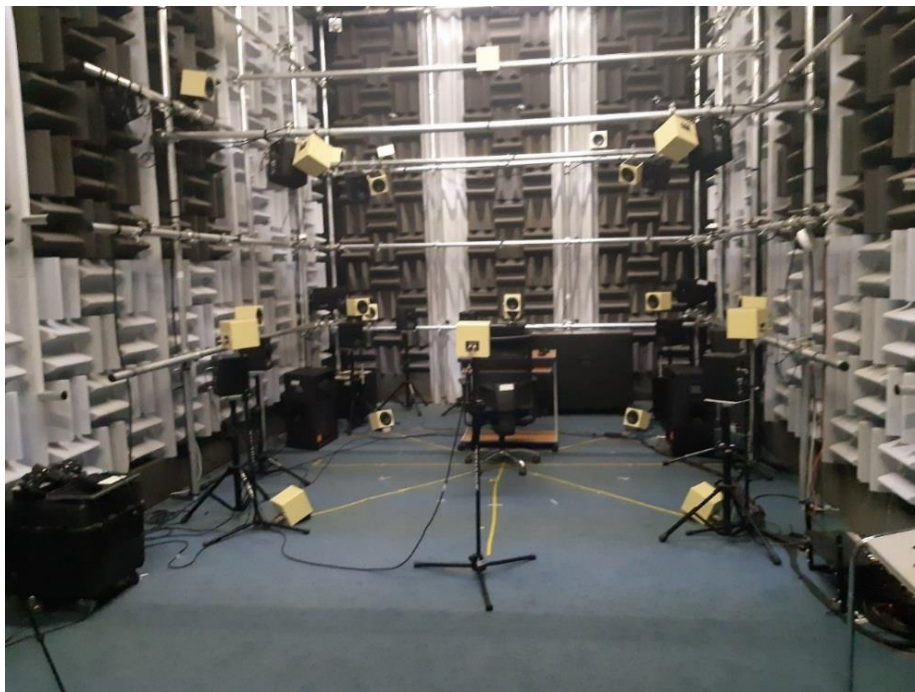
Jak już podano, opracowane stanowisko badawcze jest wykorzystywane do określenia wpływu hałasu turbin wiatrowych na człowieka i w związku z tym lokalizacje zastosowanych monitorów studyjnych, głośników oraz źródła infradźwiękowego są następujące:

- 8 monitorów studyjnych rozmieszczonych równomiernie na okręgu na płaszczyźnie równoległej do podłogi na wysokości głowy słuchacza (co 45°), przy czym pierwszy głośnik znajduje się na wprost badanej osoby,
- 4 monitory studyjne rozmieszczone równomiernie na okręgu na podłodze, skierowane w kierunku osoby badanej pod kątem 45° w stosunku do płaszczyzny podłogi, rozstawione co 90° , przy czym pierwszy głośnik jest przesunięty o kąt 45° względem pozycji badanej osoby,
- 4 monitory studyjne rozmieszczone równomiernie na w płaszczyźnie równoległej do

podłogi, powyżej głowy badanej osoby na wysokości, dla której oś głośnika z płaszczyzną głośników tworzy kąt 45° , przy czym pierwszy głośnik jest przesunięty o kąt 45° względem pozycji badanej osoby,

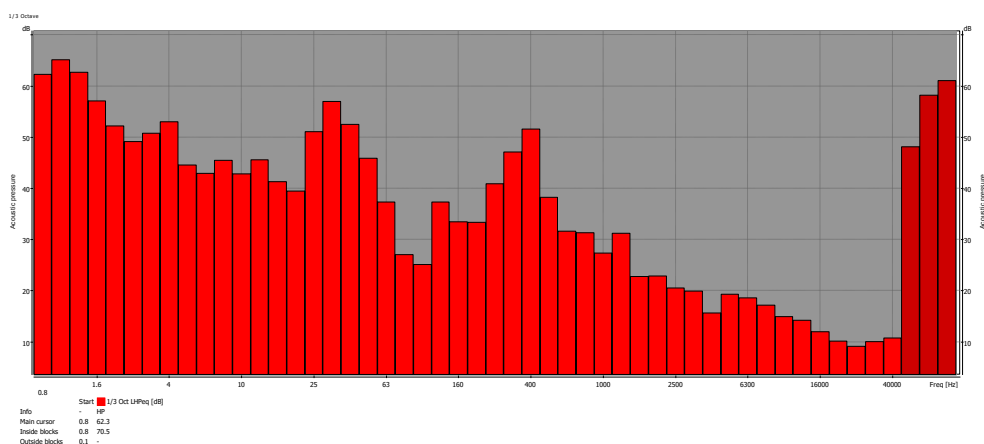
- laboratoryjne źródło infradźwięków umieszczone na podłodze, prostopadle przed badaną osobą,
- 2 głośniki niskotonowe umieszczone na podłodze pod kątem 45° względem pozycji badanej osoby.

Głowa badanej osoby znajduje się w środku sfery tworzonej przez monitory studyjne w odległości około 2 m od każdego z nich. Głośniki niskotonowe oraz źródło infradźwięków są oddalone od głowy badanej osoby o około 2,5 m. Zestawione stanowisko laboratoryjne do badania uciążliwości hałasu turbin wiatrowych jest przedstawione na Rys. 3.

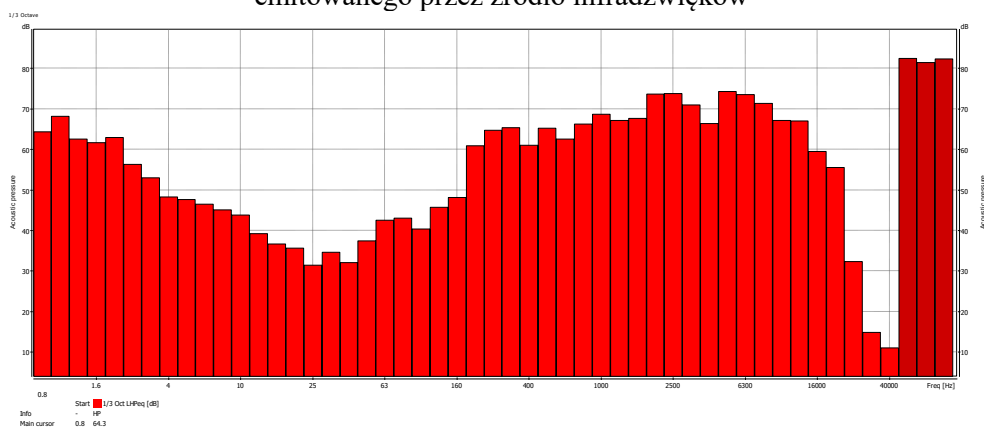


Rys. 3. Stanowisko do laboratoryjnych badań uciążliwości hałasu turbin wiatrowych

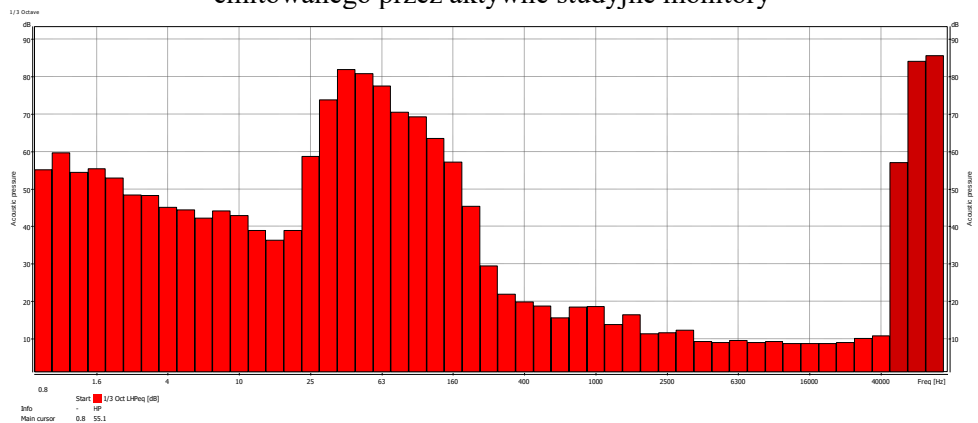
W celu potwierdzenia pasma przenoszenia głośników, w miejscu odsłuchu zarejestrowano poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3 oktaowych dla sygnału wymuszenia w postaci szumu białego. Wymuszenie zadawane było osobno na poszczególne typy głośników, a wyniki zamieszczono na Rys. 4-6.



Rys. 4. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3 oktaowych emitowanego przez źródło infradźwięków



Rys. 5. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3 oktaowych emitowanego przez aktywne studyjne monitory



Rys. 6. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3 oktaowych emitowanego przez głośniki niskotonowe

Na podstawie powyższych rysunków stwierdzono, że charakterystyka źródeł jest zróżnicowana i jedynie dla monitorów studyjnych jest miejscami płaska. Takie różnice w poziomie ciśnienia akustycznego dla poszczególnych pasm mogą mieć wpływ na prawidłowe odtworzenie zarejestrowanego sygnału. W związku z tym zdecydowano się na dwa zabiegi mające na celu poprawienie jakości odtwarzania dźwięków. Pierwszym zabiegiem było przefiltrowanie nagrań dla konkretnych typów źródeł. Sygnał zadany na studyjnych monitorach

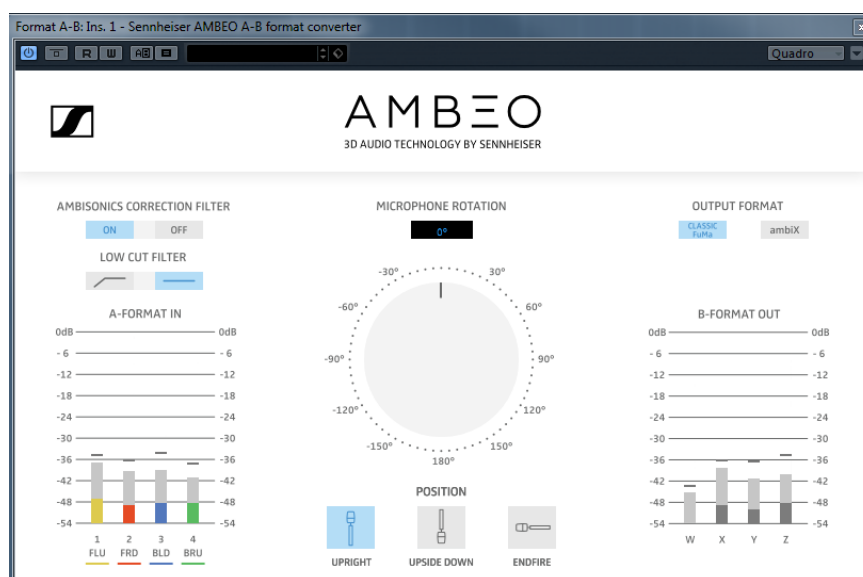
został skorygowany filtrem górnoprzepustowym z częstotliwością odcięcia wynoszącą 180 Hz, sygnał zadany na głośniki niskotonowe skorygowano filtrem środkowoprzepustowym o częstotliwościach odcięcia 40 Hz i 180 Hz, a na źródło infradźwięków zastosowano sygnał skorygowany filtrem dolnoprzepustowym z częstotliwością odcięcia 40 Hz. Po odseparowaniu konkretnych składowych częstotliwościowych na dane typy źródeł możliwy był do przeprowadzenia drugi zabieg tj. korekcja sygnału z wykorzystaniem korektorów parametrycznych. Korektory te umożliwiają ustawienie częstotliwości środkowej, wzmocnienia oraz szerokości pasma korekcji. Zabieg taki umożliwia uzyskanie widma ciśnienia akustycznego sygnału na stanowisku pomiarowym przy odtwarzaniu dźwięków turbiny wiatrowej zgodnego z widmem ciśnienia akustycznego sygnału zarejestrowanego podczas pomiarów rzeczywistych turbin wiatrowych.

Natomiast zastosowanie wspomnianego już laboratoryjnego źródła infradźwięków umożliwiło zapewnienie zgodności odtwarzanych hałasów turbin wiatrowych z zarejestrowanymi na warunkach rzeczywistych hałasami turbin również w zakresie częstotliwości hałasu niskoczęstotliwościowego.

Odtwarzanie hałasu turbiny wiatrowej wymaga przekształcenia zarejestrowanej próbki sygnału charakteryzującej hałas turbiny wiatrowej do postaci umożliwiających odtworzenie jej na wykonanym stanowisku laboratoryjnym. Wykorzystuje się do tego oprogramowanie typu DAW (tj. Nuendo z wtyczką typu VST Virtual Studio Technology), tj. Ambeo A-B Converter. Za pomocą wspomnianej wtyczki (Rys. 7) przekształca się zarejestrowaną próbkę sygnału do formatu B FuMa (ang. Furse-Malholm), tj. formatu który nie zawiera sygnału wyjściowego na poszczególne głośniki, a jest sygnałem reprezentującym pole akustyczne z miejsca rejestracji.

Następnym krokiem jest wprowadzenie współrzędnych głośników w konfiguratorze matrycy. Jest to proces niezbędny do prawidłowego dekodowania plików formatu B na odpowiednie sygnały wyjściowe na głośniki stanowiska laboratoryjnego.

Posiadając sygnał w formacie B FuMa oraz skonfigurowaną matrycę głośnikową możliwe jest jego odtworzenie hałasu turbiny wiatrowej na stanowisku laboratoryjnym za pomocą odtwarzacza DAW Nuendo Streinberg (umożliwiającego korekcję graficzną dźwięku za pomocą filtrów parametrycznych).



Rys 7. Widok okna wtyczki Ambeo A-B Converter podczas przekształcania próbek sygnałów

3. REJESTRACJA I ODTWARZANIE PRÓBEK

Pomiary hałasu oraz rejestrację próbek sygnałów charakteryzujących hałas turbin wiatrowych wykonano stosując następujące wyposażenie pomiarowo-badawcze: miernik/analizator dźwięku klasy 1 Svantek typ SVAN979 z mikrofonem G.R.A.S. 40AE, mikrofon stereofoniczny ZOOM XYH-6 X/Y, rejestrator ZOOM H6n, kalibrator akustyczny Brüel & Kjær typ 4231, stację pogodową Davis typ Vantage Vue, zestaw osłon mikrofonu do pomiaru hałasu turbin wiatrowych typ ZTW-1 firmy Sonopan.

Dla każdej z badanych turbin wiatrowych wykonano pomiary hałasu oraz rejestracji hałasu w 2 punktach pomiarowych zlokalizowanych wzdłuż osi symetrii gondoli. Jeden z tych punktów znajdował się w odległości 30 m od wieży turbiny wiatrowej od strony czołowej gondoli, zaś drugi punkt pomiarowy znajdował się w odległości 40-50 m od wieży turbiny wiatrowej od strony tylnej gondoli. Punkty pomiarowe były umieszczone na ziemi, zaś stosowane mikrofony zabezpieczono zestawem osłon przeciwwietrznych (Rys. 8).

W każdym punkcie pomiarowym dla każdej z badanych turbin wiatrowych dokonano pomiarów następujących parametrów charakteryzujących hałas:

- równoważnego poziomu dźwięku A,
- maksymalnego poziomu dźwięku A,
- szczytowego poziomu dźwięku C,
- równoważnego poziomu dźwięku G,
- poziomów ciśnienia akustycznego w tercjowych pasmach częstotliwości,

oraz dokonano rejestracji próbek sygnałów charakteryzujących hałas turbin wiatrowych. Rejestracja ta została przeprowadzona z wykorzystaniem rejestratora sprzężonego

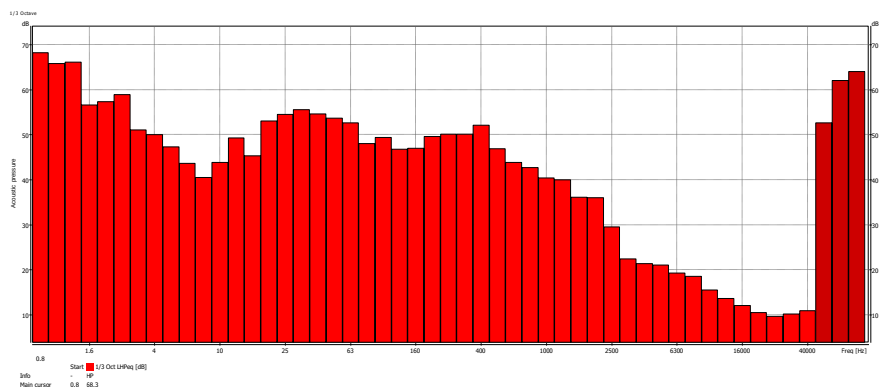
z mikrofonami w układzie XY. Czas rejestracji w każdym punkcie pomiarowym wynosi 3 min.



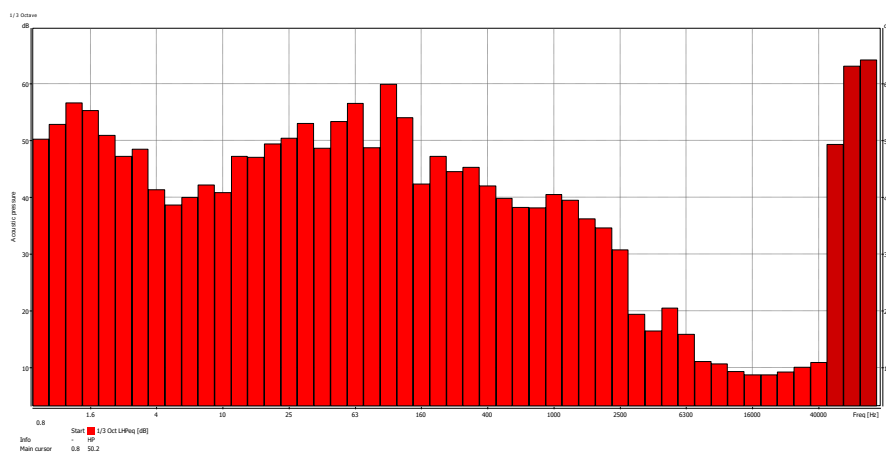
Rys. 8. Zestaw osłon zastosowany do pomiaru hałasu turbin wiatrowych

Pierwszym działaniem przy odtwarzaniu hałasu turbiny wiatrowej jest porównanie widma hałasu turbiny wiatrowej zarejestrowanego w warunkach in-situ z widmem odtwarzanego hałasu w strefie odsłuchu na laboratoryjnym stanowisku badawczym. Występujące różnice są korygowane za pomocą korektorów i ustawień wzmocnień głośników i laboratoryjnego źródła infradźwięków. Na Rys. 9 i Rys. 10 zamieszczono przykładowe widma odtwarzanych hałasów turbin wiatrowych (turbiny wiatrowej Vestas V80-2.0 MW oraz turbiny wiatrowej GE 2.5xl) w strefie odsłuchu na stanowisku badawczym.

Stanowisko do odtwarzania hałasu turbin wiatrowych zestawiono w komorze do badań akustycznych CIOP-PIB. Bazuje ono na wielokanałowym systemie odtwarzania dźwięków wykorzystującym sieć DANTE (w której transmisja cyfrowych sygnałów akustycznych realizowana jest poprzez sieć Ethernet).



Rys. 9. Widmo odtwarzanego hałasu turbiny wiatrowej Vestas V80-2.0 MW w strefie odsłuchu na stanowisku badawczym



Rys. 10. Widmo odtwarzanego hałasu turbiny wiatrowej GE 2.5 xl w strefie odsłuchu na stanowisku badawczym

4. PODSUMOWANIE

Zestawione stanowisko wykorzystywane jest do laboratoryjnych badań uciążliwości hałasu turbin wiatrowych ze względu na możliwość realizacji przez pracownika jego podstawowych zadań. W badaniach tych stosuje się opracowaną metodę badań uciążliwości hałasu turbin wiatrowych wymagającą udziału osób badanych [16]. Badanie jest podzielone na cztery części. W każdej części badania na stanowisku badawczym występuje inne wirtualne środowisko akustyczne: hałas turbiny wiatrowej o poziomie dźwięku A w strefie odsłuchu wynoszącym 30 dB, hałas turbiny wiatrowej o poziomie dźwięku A w strefie odsłuchu wynoszącym 40 dB, hałas turbiny wiatrowej o poziomie dźwięku A w strefie odsłuchu wynoszącym 50 dB oraz przyjęte jako referencyjne warunki ciszy (tzn. bez odtwarzania hałasu turbiny wiatrowej) z poziomem dźwięku A w strefie odsłuchu wynoszącym 20 dB. Podczas ekspozycji na każde z tych środowisk akustycznych badane osoby są oceniane pod względem sprawności i wydajności pracy przy pomocy komputerowych testów ALS i COG Kognitron pochodzących z Wiedeńskiego Systemu Testów. Ponadto badane osoby oceniają uciążliwość odtwarzanego hałasu za pomocą opracowanego kwestionariusza ankietowego.

5. PODZIĘKOWANIE

Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej; zadanie nr 2.SP.02 pt. Badanie uciążliwości hałasu słyszalnego i hałasu niskoczęstotliwościowego turbin wiatrowych ze względu na możliwość realizacji przez pracowników ich podstawowych zadań na stanowiskach pracy zlokalizowanych w pobliżu farm wiatrowych. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

6. LITERATURA

1. Lewandowski W. M., Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2012.
2. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 9 stycznia 2020 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2020 poz. 261).
3. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylającą dyrektywę 2001/77/WE oraz 2003/30/WE (Dz. Urz. UE L 140 z 05.06.2009, z późn. zm.).
4. Energia ze źródeł odnawialnych w 2020 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2021, file:///C:/Users/Admin/Downloads/energia_ze_zrodel_odnawialnych_w_2020_r.%20(1).pdf .
5. Michaud D. S., Keith S. E., Feder K., Voicescu S. A., Marro L., Than J., Guay M., Bower T., Denning A., Lavigne E., Whelan C., Janssen S. A., Leroux T., Van den Berg F., Personal and situational variables associated with wind noise annoyance, *Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 3, 2016, 1455-1466.
6. Michaud D. S., Feder K., Keith S. E., Voicescu S. A., Marro L., Than J., Guay M., Denning A., McGuire D., Bower T., Lavigne E., Murray B. J., Weiss S. K., Van den Berg F., Exposure to wind turbine noise: perceptual responses and reported health effects, *Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 3, 2016, 1443-1454.
7. Michaud D. S., Feder K., Keith S. E., Voicescu S. A., Marro L., Than J., Guay M., Denning A., Bower T., Villeneuve P. J., Lavigne E., Russell E., Koren G., Van den Berg F., Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 3, 2016, 1467-1479.

8. Pawlas K., Pawlas N., Boroń M., Życie w pobliżu turbin wiatrowych, ich wpływ na zdrowie – przegląd piśmiennictwa, *Medycyna Środowiskowa – Environmental Medicine*, 2012, Vol 15, No 4, 150-198.
9. Pedersen E., Health aspects associated with wind turbine noise – Results from three field studies, *Noise Control Eng. J.*, 2011, 59(1), 47-53.
10. Pedersen E., Noise annoyance from wind turbines – a review, Swedish Environmental Protection Agency, Report 5308, Stockholm, 2003.
11. Pedersen E., Larsman P., The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbine, *Journal of Environmental Psychology*, 2008, 28, 379-389.
12. Pedersen E., Persson Waye K., Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship, *Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 6, 2004, 3460-3470.
13. Pedersen E., Persson Waye K., Wind turbine noise, annoyance, and self-reported health and well-being in different living environments, *Occup Environ. Med.*, 2007, 64, 480-486.
14. Pleban D., Zagrożenia hałasem turbin wiatrowych – dane literaturowe i wyniki badań własnych, *Przegląd Mechaniczny*, nr 4, 2017, 14-17.
15. Szychowska M., Hafke-Dys H., Preis A., Kociński J., Kleka P., The influence of audio-visual interactions on the annoyance ratings for wind turbines, *Applied Acoustics*, 129 (2018), 190-203.
16. Pleban D., Radosz J., Szczepański G., Kapica Ł., Cempel C., Ocena wpływu hałasu turbiny wiatrowej na wydajność pracy człowieka – badania pilotażowe, *Rynek Energii*, 1 (152), 2021, 46-51.

ULTRADŹWIEKOWA TECHNIKA HAPTYCZNA – DZIAŁANIE, PRZEWIDYWANE ZASTOSOWANIA I OCENA ZAGROŻENIA HAŁASEM ULTRADŹWIEKOWYM

Marlena PODLEŚNA, Leszek MORZYŃSKI, Krzysztof ŁADA, Anna WŁUDARCZUK,
Michał KWARTNIK

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

1. WPROWADZENIE

Ultradźwiękowa technika haptyczna to nowo powstała technika umożliwiająca generowanie w powietrzu określonych kształtów, które, choć niewidoczne, mogą być wyczuwalne dla ludzkich dłoni. Technika ta była obiektem zainteresowań już od lat 60 ubiegłego wieku, kiedy to zaprezentowano pierwsze urządzenie bazujące na matrycy szpilek transmitujących wibracje do skóry człowieka [1]. Urządzenie to było przeznaczone przede wszystkim dla osób z niepełnosprawnością wzroku. Możliwość pobudzania zmysłu dotyku za pomocą dźwięku została po raz pierwszy zaprezentowana w 1994 roku na Uniwersytecie w Rochester [2], gdzie jako medium rozchodzenia się fali zastosowano wodę. W następnych latach udało się przenieść sygnał z wody do powietrza [3, 4, 5], dzięki tak zwanemu ciśnieniu promieniowania akustycznego, czyli nieliniowej ekspozycji na skupioną wiązkę ultradźwiękową. Odkrycie to otworzyło drogę do opracowania ultradźwiękowych urządzeń haptycznych, a wraz z prowadzonymi badaniami powstały pierwsze prototypy urządzeń wykorzystujących tę technologię [4]. UltraHaptics STRATOS Inspire i Explore [6] to pierwsze komercyjnie dostępne urządzenia, które oprócz generacji obiektów w powietrzu umożliwiają śledzenie ręki użytkownika przy pomocy kamer UltraLeap. Ich pojawienie się na rynku daje nadzieję na szybkie wprowadzenie ultradźwiękowej techniki haptycznej do użytku powszechnego, jednakże oznacza również, tak jak w przypadku każdej nowej techniki, potrzebę oceny tych urządzeń pod kątem bezpieczeństwa dla jej użytkowników. W dalszej części artykułu przedstawiono zasadę działania haptycznych matryc ultradźwiękowych, dyskusję potencjalnych możliwości ich zastosowań, opis testowanych urządzeń oraz wyniki wstępnej oceny zagrożenia hałasem ultradźwiękowym pochodzącym od ultradźwiękowych przetworników haptycznych.

2. ZASADA DZIAŁANIA

Badania nad stymulacją powierzchniowych receptorów czuciowych ludzkich palców przy użyciu ultradźwięków były prowadzone od wczesnych lat 70 ubiegłego wieku [7], jednak dopiero w 1995 roku Dalecki et al. zaproponowała stosowanie ultradźwięków w wodzie do stymulacji receptorów czuciowych palca, do którego przymocowany został akustyczny

reflektor unoszący się na powierzchni wody [2]. Później udowodniono, że sama skóra może działać jak akustyczny reflektor w powietrzu, bez konieczności użycia dodatkowych membran ani wody [3, 5]. Nie dotyczy to jednak każdej skoncentrowanej wiązki ultradźwiękowej, jako że receptory reagują przede wszystkim na zmiany w deformacji skóry. Aby stymulacja była skuteczna zmiany powinny zachodzić z częstotliwością 0,4-500 Hz [8], osiąga się to przez modulację sygnału ultradźwiękowego o częstotliwości 40 kHz.

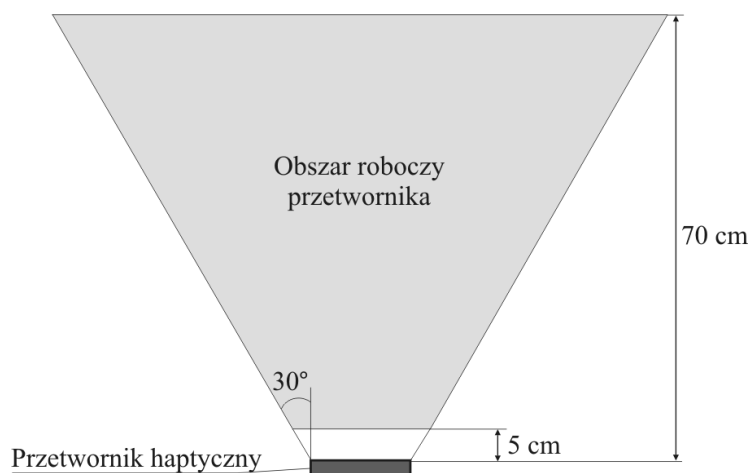
W znanych rozwiązaniach konstrukcyjnych ultradźwiękowych przetworników haptycznych stosuje się dwa rodzaje modulacji: amplitudową (Amplitude Modulation, AM) oraz czasowo-przestrzenną (ang: Spatiotemporal Modulation, STM). W modulacji amplitudowej wyświetlany punkt pozostaje w tym samym miejscu, jednak jest włączany i wyłączany (lub inaczej: jego amplituda zmienia się naprzemiennie z 0 do maksymalnej) zadaną częstotliwością. Grupa wytworzonych punktów na płaszczyźnie tworzy zadany kształt. W modulacji czasoprzestrzennej generowany jest tylko jeden punkt, który kreśli zadany kształt z określoną częstotliwością.

3. ROZWIĄZANIA BADAWCZE I EKSPLOACJA MOŻLIWOŚCI

Badania wskazują, że zastosowanie technologii haptycznych, nie tylko ultradźwiękowych, wpływa pozytywnie na zwiększenie wydajności wykonywanych zadań przy zastosowaniu we współpracy ze wskazówkami wizualnymi, jednak nie zawsze efektywnie je zastępuje [9]. Istnieje również ograniczenie przestrzeni zastosowania rozwiązań haptycznych jedynie do płaskich wyświetlaczy, które łatwo można zastąpić tradycyjnymi panelami z przyciskami, guzikami i tym podobnymi elementami kontrolnymi. Takie rozwiązania nie pozwalają jednak na dynamiczne zmiany panelu kontrolnego, zależnie od aktualnych potrzeb. Istnieją również urządzenia haptyczne zakładane na rękę użytkownika [10, 11, 12]. Jest to rozwiązanie gwarantujące większą swobodę ruchu i prezentujące większy potencjalny wachlarz zastosowań, jednak narzucające kolejne ograniczenia w postaci konieczności zakładania dodatkowego oprzyrządowania przed każdą interakcją z interfejsem oraz ewentualnego dopasowywania go do indywidualnej anatomii użytkownika.

Ultradźwiękowa technologia haptyczna łączy obydwa podejścia. Pozwala na dynamiczne zmiany interfejsu w zależności od aktualnych potrzeb użytkownika, jednak nie jest ograniczona do dwóch wymiarów. Przetworniki umożliwiają wyświetlanie dowolnych elementów w całej przestrzeni roboczej matrycy. Na Rys. 1 przedstawiono przykład przestrzeni roboczej dla dostępnego na rynku przetwornika, przypominającą ostrosłup o ściętym wierzchołku, z powierzchnią górnej podstawy równą powierzchni matrycy, wysokością około 70 cm oraz kątem nachylenia ścian około 30 stopni (na podstawie materiałów reklamowych producenta

przetwornika STRATOS Explore [13]). Stosując wiele matryc, lub różne ich ustawienia, można znacznie zwiększyć objętość obszaru roboczego, być może nawet do całego stanowiska roboczego, a nie jedynie jego części [14, 15].



Rys. 1. Wizualizacja pola roboczego urządzenia UltraHaptics STRATOS, rzut z boku.

Dobrze zaimplementowana ultradźwiękowa technologia haptyczna może znaleźć szereg zastosowań, od materiałów reklamowych po interfejsy sterowania maszynami na stanowiskach roboczych. W literaturze zwraca się uwagę na znacznie dłuższe czasy interakcji i retencję informacji o produkcie w przypadku zastosowania matryc w kontekście marketingowym. Znajomość tych relacji mogłaby przyczynić się do lepszego przyswajania informacji o zasadach bezpieczeństwa w miejscu pracy poprzez zastosowanie interaktywnych prezentacji o znacznie większym stopniu zaangażowania osoby szkolonej. Oprócz wspomnianych wcześniej adaptacyjnych interfejsów człowiek-maszyna, mogłyby służyć jako systemy kierujące czy wczesnego ostrzegania na stanowisku roboczym, co mogłoby pomóc w zawodowej aktywizacji osób z niepełnosprawnościami wzroku. Ponadto bezdotykowe interfejsy znacznie zwiększyłyby higienę publicznych urządzeń, takich jak chociażby bankomaty czy automaty z jedzeniem, co okazuje się szczególnie ważne w dzisiejszych czasach.

Nie jest to jednak rozwiązanie idealne. Generowane w wymienionych urządzeniach sygnały ultradźwiękowe o wysokim poziomie ciśnienia akustycznego mogą mieć negatywny wpływ na zdrowie człowieka. Do wytworzenia odczuwalnych wrażeń na skórze człowieka [16] wymagane jest wygenerowanie ultradźwięków, których poziom ciśnienia akustycznego w punkcie skupienia wynosi ok. 145 dB. Wedle stanu obecnej wiedzy, dla ultradźwięków o częstotliwości 40 kHz już przy 110 dB mogą występować subiektywne efekty słuchowe [17], oraz może występować niekorzystne oddziaływanie na organizm człowieka. Z tego względu istnieje potrzeba przetestowania ultradźwiękowych urządzeń haptycznych pod kątem bezpieczeństwa użytkowania, szczególnie przez wydłużony okres.

4. BADANE URZĄDZENIA

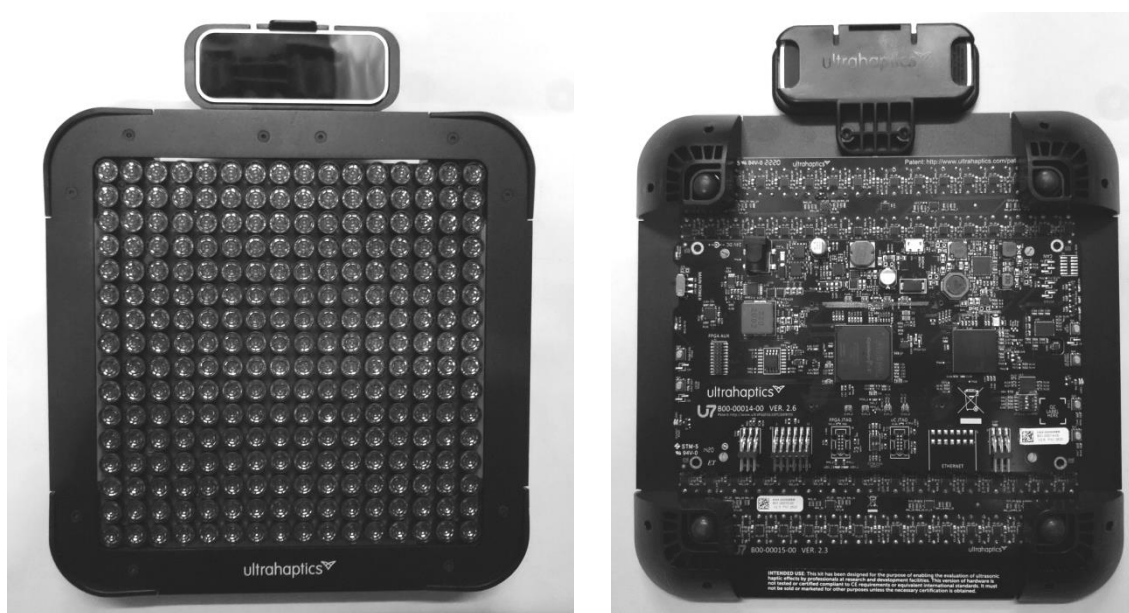
Przedstawioną w artykule ocenę zagrożenia hałasem ultradźwiękowym, którego źródłem może być ultradźwiękowa technika haptyczna przeprowadzono dla dwóch dostępnych na rynku urządzeń z rodziny STRATOS firmy Ultraleap: STRATOS Explore Development Kit oraz STRATOS Inspire Haptic Module (Rys. 2a, b). Pierwszy z nich jest urządzeniem deweloperskim, przeznaczonym do badań rozwojowych. Drugi z nich może być używany zarówno w pracach rozwojowych jak i w przestrzeni publicznej, posiada certyfikaty bezpieczeństwa i spełnia standardy regulacji elektroniki (CE, FCC, NRTL, PSE, RoHS, REAC) [17]. Oprócz przeznaczenia, główną różnicą jest rozmiar oraz obudowa urządzenia – Inspire jest znacznie cięższy i większy, wyposażony w obudowę klasy IP4X. Explore za to nie posiada tylnej obudowy, co pozwala na swobodny dostęp do wszystkich komponentów urządzenia. Obydwie matryce wyposażone są w 256 przetworników muRata MA40S4S, z częstotliwością odświeżania 40 kHz. Dodatkowo do każdego urządzenia dołączona jest kamera UltraLeap, która służy do precyzyjnego śledzenia pozycji i ułożenia dłoni w przestrzeni nad urządzeniem. Kamera ta umożliwia, dzięki rozpoznawaniu obecności dłoni użytkownika w polu roboczym przetwornika, włączanie matrycy ultradźwiękowej tylko w chwilach gdy użytkownik korzysta z przetwornika, co pozwala na eliminację zbędnej ekspozycji na ultradźwięki. W przygotowanych przez producenta i udostępnianych wraz z urządzeniem przykładach demonstrujących możliwości techniczne urządzenia, zadane kształty generowane są jedynie, gdy ręka użytkownika znajduje się w obrębie obszaru roboczego, w miejscu interakcji z kształtem. Istnieje również możliwość korzystania z urządzenia bez zastosowania kamery.



Rys. 2a. UltraHaptics STRATOS Inspire, widok z góry



Rys. 2b. UltraHaptics STRATOS Inspire, widok z dołu



Rys. 3. UltraHaptics STRATOS Explore, widok z góry oraz od dołu

Oprócz matryc producent zapewnia dostęp do dedykowanego środowiska programistycznego (UltraHaptics Software Development Kit, SDK) oraz interfejsu programowania aplikacji (Application Programming Interface, API), które umożliwiają rozwój oprogramowania dla przetworników oraz zaprogramowanie generowanych kształtów. Zostało to wykorzystane w badaniach.

5. BADANIA PILOTAŻOWE

Badania pilotażowe zostały wykonane w komorze akustycznej w CIOP-PIB. Jest to komora zaprojektowana tak, aby zminimalizować tło akustyczne oraz odbicia fali akustycznych od ścian. Każde z testowanych urządzeń zostało umieszczone na środku stołu o parametrach zgodnych ze standardowymi dla pomiarów hałasu, według normy ECMA-74, ustawionego w odległości 1,5 m od każdej ze ścian, zgodnie z normą ISO 11201:2012. Urządzenia zostały podłączone do laptopa z zainstalowanym środowiskiem programistycznym (SDK)

dostarczany przez producenta, który kontrolował zadany sygnał. Akwizycji poziomu ciśnienia akustycznego dokonano przy pomocy systemu analitycznego Brüel & Kjær Pulse typu 3560C z mikrofonem 4944A. Podczas badań zmierzono równoważny poziom ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3 oktawy z częstotliwościami średniego pasma w zakresie 50 Hz-50 kHz. Mikrofon został umieszczony tuż przy prawym uchu osoby badanej, zgodnie z normą PN-Z-01339: 2020-12, tak jak przedstawiono na Rys. 4. Wyniki zostały zapisane używając oprogramowania Pulse LabShop, w szczególności funkcji „CPB Analyzer”.



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe

W pracy przedstawiono badania przeprowadzone na dwóch osobach o podobnym wzroście. Dla każdej osoby badania przeprowadzono w dwóch pozycjach osoby badanej: stojącej obok przetwornika z rękami swobodnie opuszczonymi wzdłuż ciała oraz dotykającej prawą ręką do generowanego kształtu. Ponieważ ultradźwięki są silnie tłumione w powietrzu oraz przez różnego rodzaju przeszkody, wzrost osoby korzystającej z przetwornika oraz położenie jej ręki może mieć istotne znaczenie dla wyniku oceny zagrożenia. Zestawienie wymiarów osób badanych oraz wynikających z nich wymiarów w układzie badawczym przedstawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie wymiarów w cm dla układu badawczego

Urządzenie	Explore	Inspire
Wzrost osoby badanej	165	162
Odległość ziemia-mikrofon	165	162
Odległość ziemia-bark	148	146
Długość kończyny górnej	80	74
Długość ręki (bez nadgarstka)	19	19
Szerokość ręki	10	10

dużo niższe, nie mające wpływu na ocenę zagrożenia) prezentowane są wyniki badań jedynie dla pasma 40 kHz. Każdy z pomiarów wykonano trzykrotnie a wyniki pomiarów uśredniono. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tab. 2.

Badania zostały przeprowadzone dla trybu modulacji amplitudowej dla okręgu, kwadratu oraz punktu, a także dla modulacji czasoprzestrzennej dla kwadratu. Ponieważ największe poziomy ciśnienia akustycznego notuje się w paśmie o częstotliwości środkowej 40 kHz, (wartości poziomów ciśnienia akustycznego w pozostałych pasmach są

Tab. 2. Zestawienie wyników pomiarów równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 40 kHz przy uchu osoby badanej

Kształt	Stałe parametry	Badany parametr		Równoważne poziomy ciśnienia akustycznego [dB]			
				Z ręką		Bez ręki	
				Explore	Inspire	Explore	Inspire
Punkt	200 Hz, in = 1	Wysokość [cm]	10	118,7	121,7	119,7	132,7
			20	115,7	111,3	115,0	123,7
			30	114,3	109,3	113,0	122,7
	20 cm, in = 1	Częstotliwość [Hz]	50	113,0	113,3	114,3	123,0
			100	113,3	113,3	111,3	122,7
			200	110,7	116,3	114,0	123,0
Okrąg	200 Hz, in=1.0, r = 2.0	Wysokość [cm]	10	119,0	122,7	130,7	136,7
			20	119,0	120,0	118,7	127,0
			30	124,3	119,0	121,7	124,3
	20 cm, in = 1.0, r = 2.0	Częstotliwość [Hz]	50	121,0	119,3	121,0	127,7
			100	120,0	118,0	119,7	127,7
			200	119,7	112,3	118,7	127,0
	20 cm, 200 Hz, in = 1.0	Promień r [cm]	2	120,3	111,7	115,0	126,7
			4	121,0	114,7	118,3	126,3
Kwadrat	200 Hz, r = 2.0, H = 20 cm, in = 1.0	Modulacja ST		120,7	110,0	116,3	124,7
	200 Hz, in=1.0, l = 4.0	Wysokość [cm]	10	118,0	111,0	129,3	135,0
			20	120,7	112,3	113,0	127,7
			30	125,3	116,3	122,0	123,7
	20 cm, in = 1.0, l = 4.0	Częstotliwość [Hz]	50	124,0	118,0	126,7	128,3
			100	125,3	112,3	120,0	127,7
			200	123,3	112,0	120,3	127,0
	20 cm, 200 Hz, in = 1.0	Długość boku [cm]	4	122,0	109,7	116,7	126,7
			8	124,0	115,0	121,0	125,7

Dla obydwu urządzeń poziom ciśnienia akustycznego jest znacznie wyższy dla badania przeprowadzonego bez wyciągniętej ręki, co wskazuje na to, że dłoń użytkownika może znacząco wpływać na rozproszenie fali akustycznej. Najwyższe ciśnienie występuje dla modulacji na wysokości 10 cm nad urządzeniem, a najniższe dla najmniejszych rozmiarów prezentowanego kształtu. W przeprowadzonych badaniach żadne z urządzeń nie wykazywało jednoznacznie wyższych poziomów ciśnienia akustycznego, mierzonego przy uchu osoby badanej.

6. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Hałas ultradźwiękowy w Polsce jest uznawany za czynnik szkodliwy środowiska pracy [18, 19, 20] mogący wpływać negatywnie na zdrowie osoby na niego narażonej. Z tego

względem dla hałasu ultradźwiękowego określono wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN), po przekroczeniu których nie może być wykonywana praca w zagrożeniu hałasem ultradźwiękowym. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. [18] hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy charakteryzowany jest przez:

- równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz odniesione do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy lub równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz odniesione do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy,
- maksymalne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz.

Dla pasma o częstotliwości środkowej 40 kHz przyjęte wartości NDN wynoszą 110 dB dla równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy oraz 130 dB dla maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego.

Jak wynika z Tab. 2 zmierzone wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 40 kHz zawierały się w przedziale od 109,3 dB do 136,7 dB. Skrajne górne wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego przekraczały 130 dB, co prowadzi do wniosku, że przekroczona została wartość dopuszczalna maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego. Ponadto w większości przypadków równoważne poziomy ciśnienia akustycznego przekraczały 110 dB. Oznacza to, że przy długotrwałym (tzn. po kilka godzin dziennie) korzystaniu z ultradźwiękowej techniki haptycznej może dojść do przekroczenia wartości dopuszczalnej równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinnego czasu pracy. W dużej mierze zależy to jednak od czasu pracy z przetwornikiem oraz parametrów generowanych za jego pomocą kształtów.

7. PODSUMOWANIE

Podsumowując przedstawione informacje i wyniki badań należy stwierdzić, że ultradźwiękowa technika haptyczna to nowa i dynamicznie rozwijająca się technologia, która rozbudza wyobraźnię możliwościami wykorzystania jej w wielu dziedzinach życia. Pozwala na niespotkaną do tej pory swobodę interakcji z różnorodnymi interfejsami człowiek-maszyna i daje nadzieję na pomoc osobom niepełnosprawnym w powrocie do miejsc pracy. Niemniej jednak wskazana jest ostrożność odnośnie powszechnego wykorzystania tej techniki, gdyż

może ona stać się źródłem zagrożenia hałasem ultradźwiękowym potencjalnie szkodliwym dla człowieka.

8. PODZIĘKOWANIE

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, projekt nr II.PB.13 pt „Rozwój i badania właściwości ultradźwiękowej technologii haptycznej ze szczególnym uwzględnieniem możliwości jej zastosowania na potrzeby osób niepełnosprawnych”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

9. LITERATURA

1. Linvill J. G., Bliss J. C., A Direct Translation Reading Aid for the Blind, Proceedings of the IEE vol. 54, no. 1, 40 (1996)
2. Dalecki D., Child S., Raeman C., Carstensen E., Tactile perception of ultrasound, The Journal of the Acoustical Society of America 97, 3165 (1995)
3. Carter T., Seah S. A., Long B., Drinkwater B., Andsubramanian S., Ultrahaptics: multi-point mid-airhaptic feedback for touch surfaces., In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, 505 (2013)
4. Takayuki I., Mari T., Hiroyuki S., Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, Lecture Notes in Computer Science, 504 (2008)
5. Hoshi T., Takahashi M., Iwamoto T., Andshinoda H., Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound, IEEE Transactions on Haptics vol 3, no. 3, 155 (2010)
6. "Haptics | Ultraleap". <https://www.ultraleap.com/haptics/>. (2022)
7. Gavrilov L., Tsurulnikov E., Mechanisms of Stimulation Effects of Focused Ultrasound on Neural Structures: Role of Nonlinear Effects. Nonlinear Acoustics at the Beginning of 21-st Century 1, 445 (2002)
8. Gesheider G. A., Bolanowski S. J., Pope J. V., Verrillo R. T., A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation, Somatosensory & Motor Research vol 19 no. 2, 114 (2002)
9. Prewett M. S., Elliott L. R., Walvoord A. A. G., Coover M., A Meta-Analysis of Vibrotactile and Visual Information Displays for Improving Task Performance, IEEE

- Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews) vol. 42 no. 1, 123 (2012)
10. Wusheng C., Tianmiao W., Lei H., Design of data glove and arm type haptic interface, Proceedings of 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 422 (2003)
 11. Rekimoto J., SenseableRays: Opto-Haptic Substitution for Touch-Enhanced Interactive Spaces, Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems, 2519 (2009)
 12. Weiss M., Wacharamanotham C., Voelker S., Brochers J., FingerFlux: Near-surface haptic feedback on tablespots, Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 615 (2011)
 13. Ultraleap STRATOS™ Explore Datasheet, available at https://www.ultraleap.com/datasheets/STRATOS_Explore_Development_Kit_datasheet.pdf
 14. Hasegawa K., Shinoda H., Aerial Display of Vibrotactile Sensation with High Spatial-Temporal Resolution using Large-Aperture Airborne Ultrasound Phased Array, 31 IEEE World Haptics Conference 2013, 31 (2013)
 15. Hoshi T., Development of Aerial-Input and Aerial-Tactile-Feedback System, IEEE World Haptics Conference, 569 (2011)
 16. Di Battista A., The effect of 40 kHz ultrasonic noise exposure on human hearing, PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics, 4783 (2019)
 17. Ultraleap STRATOS™ Inspire Datasheet, available at https://www.ultraleap.com/datasheets/STRATOS_Inspire_Datasheet.pdf
 18. 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 (Dz. U. 2018 r. poz. 1286 z późn. zm.).
 19. Pośniak M., Skowroń J. (red.), Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne, CIOP-PIB (2020).
 20. Koradecka D. (red.), Bezpieczeństwo i higiena pracy, CIOP-PIB, Warszawa (2008)

OCENA ODDZIAŁYWANIA AKUSTYCZNEGO FARMY WIATROWEJ GŁUCHÓW PODCZAS JEJ EKSPLOATACJI

Hubert ŚMIETANKA*, Mateusz KACPEREK*, Krzysztof KALWASIŃSKI*, Ryszard
DANECKI**

* Instytut Energetyki-Institut Badawczy, Pracownia Oddziaływań Środowiskowych
i Ochrony Przeciwpzepięciowej, 01-330 Warszawa, ul. Mory 8

** Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Katowicach – senior

1. WPROWADZENIE

Instytut Energetyki – Institut Badawczy prowadzi od wielu lat badania m.in. z zakresu oddziaływań akustycznych obiektów elektroenergetycznych i innych. W roku 2021 przystąpiono do modernizacji posiadanego wyposażenia, metodyk i możliwości pomiarowych w ramach realizowanego ze środków statutowych programu badań pt. „Wdrożenie oraz zastosowanie wykonawcze metod badań i oceny kształtowania klimatu akustycznego w środowisku, w obszarze sektora Energetyki Odnawialnej (OZE)”, praca EOS/23/Stat/21. Praca ta jest kolejną realizowaną pracą w tym temacie i planowany jest dalszy rozwój tej tematyki.

W wyniku analizy możliwości logistycznych, potencjału badawczego i położenia obiektu badań nawiązano kontakt z właścicielem Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW i po akceptacji warunków badań przystąpiono do ich realizacji w terenie.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem badań było określenie wielkości oddziaływań akustycznych, przenikających do środowiska, w związku z eksploatacją turbozespołów wiatrowych, pozostających we własności oraz zarządzie Podmiotu Enwind Sp. z o.o. ul. Złota 59, 00-120 Warszawa, posadowionych oraz eksploatowanych na terenie Gminy Głuchów (miejsko-wiejskiej), powiat skierniewicki (woj. łódzkie), w sąsiedztwie obszaru zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej wolnostojącej i zabudowy zagrodowej, w rejonie drogi publicznej, gminnej, w trybie realizacji zadania wdrożeniowego Instytutu, celem podjęcia zadań w zakresie kontroli warunków korzystania ze środowiska, w świetle obowiązujących wymagań Ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo Ochrony Środowiska (tekst jednolity Dz. U. 2017, Poz. 519, z późn. zm.) [2].

Celem pomiarów było sprawdzenie czy określone na podstawie pomiarów wartości poziomu hałasu emitowanego do środowiska nie przekraczają dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (wyrażonych wskaźnikami L_{AeqD} i L_{AeqN} – w dB), określonymi w ww. rozporządzeniu [3] oraz Decyzji Wójta Gminy Głuchów nr 5/208 r. z dnia 5 września 2008 r. o środowiskowych uwarunkowaniach zgody na realizację przedsięwzięcia polegającego na

budowie Farmy Elektrowni Wiatrowych GŁUCHÓW wraz z urządzeniami do przesyłania energii elektrycznej i infrastrukturą towarzyszącą, położonych w gminie Głuchów w obrębach geodezyjnych: Borysław, Reczul, Białynin Krasówka, Celigów, Białynin Południe, Prusy, Głuchów i Kochanów, gmina Głuchów [4]. Zakres oceny akustycznej obejmował obszarowo całość istniejącego kompleksu Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW zlokalizowanej na ww. terenie.

3. PODSTAWA PRAWNA OCENY SZKODLIWOŚCI HAŁASU TURBOZESPOŁÓW WIATROWYCH

Pomiary poziomu dźwięku A [dB] w środowisku, w związku z eksploatacją instalacji i urządzeń Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW, przeprowadzono w sposób podany w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 7 września 2021 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody, Załącznik nr 7 (tj. Dz. U. z 2019, Poz. 2286, z późn. zm.). Na podstawie tych przepisów opracowano Procedurę badawczą PB-EOS Nr 03, wyd. Instytut Energetyki – Instytut Badawczy, Pracownia Oddziaływań Środowiskowych i Ochrony Przeciwpzepięciowej, z siedzibą w Warszawie [5].

4. PARAMETRY TECHNICZNE I LOKALIZACJA BADANYCH TURBIN WIATROWYCH

Na terenie Farmy Elektrowni Wiatrowej GŁUCHÓW znajdują się źródła emisji hałasu przemysłowego i instalacyjnego do środowiska w charakterze 10-ciu turbozespołów przetwarzających energię kinetyczną wiatru w energię elektryczną. Turbozespoły te posiadają podstawową charakterystykę, jak pokazano w Tab. 1.

Tab. 1. Charakterystyka techniczna badanych turbozespołów

Typ	VESTAS V90-2,0 MW
Moc	2000 kW
Średnica wirnika	90,00 m
Wysokość wieży	105 m
Generator	Asynchroniczny
Ilość generatorów	10 szt.
Koncepcja turbiny	Przekładniowa
Ilość łopat turbiny	3 szt.
Obszar omiotania łopat turbiny	6362 m ²
Prędkość wiatru przy starcie	2,5 m/s
Prędkość wiatru dla mocy maksymalnej	25,0 m/s
Prędkość wiatru hamowania	25,0 m/s
Pojemność zbiornika oleju	160 l

Rozpatrywane obiekty turbozespołów wiatrowych stanowią autonomiczne jednostki wytwórcze w postaci turbogeneratorów wiatrowych, typu śmigłowego, o poziomej osi obrotu oraz wirnika trójłopatowym, kierowanym, nawietrznym, zamocowanym w gondoli, zawierającej generator, przekładnię, łożyska, przekształtnik energoelektryczny, układy smarowania, chłodzenia, hamowania, transformator blokowy oraz układy sterowania położeniem turbiny względem kierunku wektora wiatru.

Ogół wyżej wymienionych układów, a ponadto, zintegrowane z wyżej

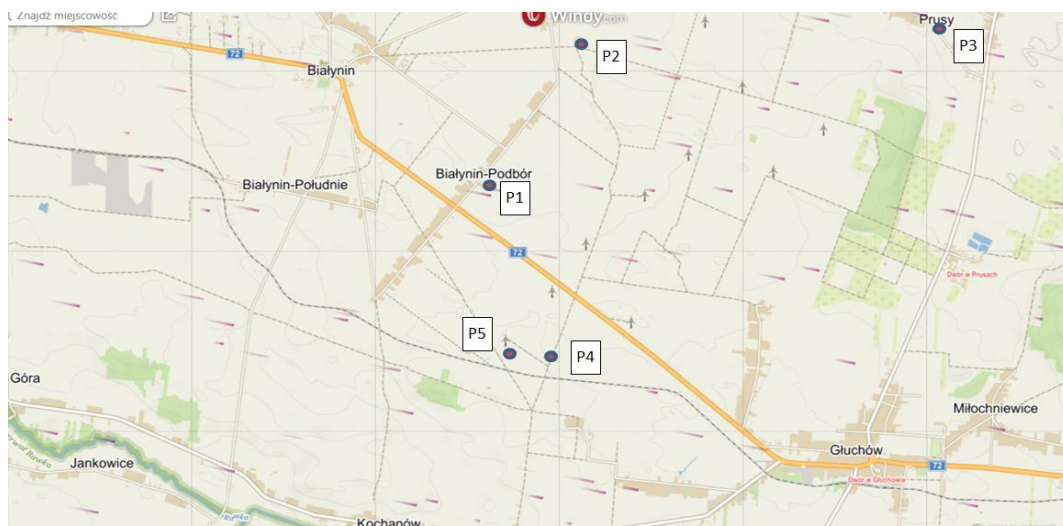
wymienionymi, układy pomiarowe oraz systemy telekomunikacji znajdują się w wieży nośnej, osadzonej w trwałym fundamencie gruntowym.

5. CHARAKTERYSTYKA TERENU I LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH

Funkcjonująca Farma Elektrowni Wiatrowej GŁUCHÓW zlokalizowana jest na terenach o wykorzystaniu rolniczym, przy drodze krajowej Nr 72 Konin-Łódź-Rawa Mazowiecka. Farma wiatrowa zlokalizowana jest pomiędzy miejscowościami:

- Od strony północnej – miejscowości Reczul oraz Borysław,
- Od strony wschodniej – miejscowości Michowice, Celigów, Głuchów,
- Od strony południowej – miejscowości Kochanów,
- Od strony zachodniej – miejscowości Białynin Podbór, Białynin Łatków.

Lokalizację punktów pomiarowych (referencyjnych) dźwięku przedstawiono na szkicu sytuacyjnym terenu badań akustycznych w środowisku – Rys. 1.



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych dźwięku przedstawiona na szkicu sytuacyjnym terenu badań akustycznych w środowisku

Punkty pomiarowe zlokalizowano na terenach chronionych akustycznie:

- pkt pom. P1 – na posesji nr 9, Białynin Podbór,
- pkt pom. P2 – na posesji Nr 42, Białynin Łatków,
- pkt pom. P3 – na posesji Nr 22, Prusy.

Szacowana odległość lokalizacji punktów pomiarowych dźwięku względem pozycjonowania najbliższej konstrukcji rozpatrywanych jednostek turbozespołów wiatrowych, w środowisku, wynosi odpowiednio:

- L1: ~885 m, względem punktu obserwacji dźwięku P1
- L2: ~1000 m, względem punktu obserwacji dźwięku P2
- L3: ~1250 m, względem punktu obserwacji dźwięku P3.

Punkty pomiarowe P4 i P5 są punktami uzupełniającymi służącymi do oszacowania poziomu mocy akustycznej pojedynczego źródła dźwięku elektrowni wiatrowej.

6. KWALIFIKACJA TERENU POD WZGLĘDEM STANDARDÓW AKUSTYCZNYCH

Lokalizację stanowisk pomiarowych usytuowano na terenach zabudowy zagrodowej podlegających chronione przed hałasem.

7. DOPUSZCZALNE POZIOMY HAŁASU

Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku (w dB) wyrażone wskaźnikami L_{AeqD} , dB i L_{AeqN} , dB, dla terenów, w których usytuowano miejsca pomiarowe, wg rozporządzenia [3] i [4] oraz Decyzji Wójta Gminy Głuchów nr 5/208 r. z dnia 5 września 2008 r. o środowiskowych uwarunkowaniach zgody na realizację przedsięwzięcia polegającego na budowie „Farmy elektrowni wiatrowych GŁUCHÓW” wraz z urządzeniami do przesyłania energii elektrycznej i infrastrukturą towarzyszącą wynoszą:

- w porze dziennej (06:00 – 22:00): L_{AeqD} wynosi 50 dB;
- w porze nocnej (22:00 – 06:00): L_{AeqN} wynosi 40 dB.

8. OPIS I LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH

Pomiary wykonano w 3 miejscach na terenach kwalifikowanych jako zabudowa zagrodowa. Zlokalizowano je na granicach terenów chronionych przed hałasem, w sąsiedztwie budynków mieszkalnych. Lokalizację miejsc pomiarowych przedstawia Tab. 2. Warunki atmosferyczne w czasie pomiarów ujmuje Tab. 3. Warunki atmosferyczne w czasie pomiarów zarejestrowano na wysokości 4 m n.p.t. Wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 2-4.

9. METODYKA BADAŃ

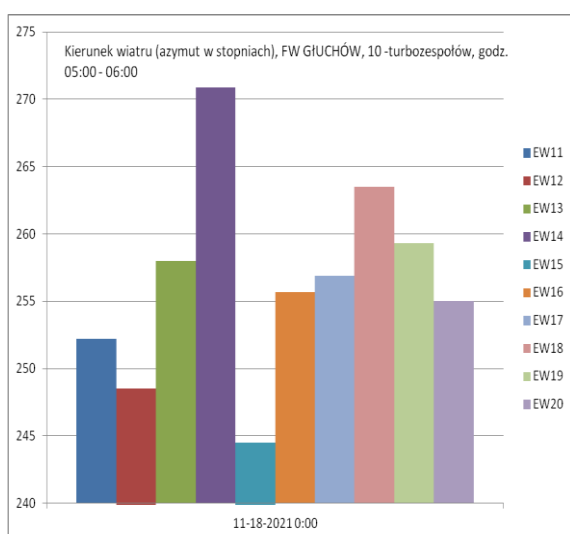
Projekt badawczy realizowano na podstawie Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2014 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody, Załącznik nr 7 – Metodyka referencyjna wykonywania okresowych pomiarów hałasu w środowisku, pochodzącego z instalacji lub urządzeń, z wyjątkiem hałasu impulsowego (Dz. U. 2014, Poz. 1542).

Tab. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych

Lp	Nazwa/ opis punktu	Położenie (GPS)	Wysokość nad poziomem terenu [m]	Uwagi
1	P1	N 51°48'13" E 20°2'13"	4	Białynin Podbór, posesja Nr 9
2	P2	N 51°48'36" E 20°2'31"	4	Białynin Latków, posesja Nr 42
3	P3	N 51°48'43" E 20°5'2"	4	Prusy, posesja Nr 22

Tab. 2. Termin pomiarów i warunki środowiskowe podczas ich wykonywania

Data	Godzina pomiarów	Warunki środowiskowe				
		Temperatura [°C]	Wilgotność [%]	Prędkość wiatru [m/s]	Kierunek wiatru -	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]
17.11.2021	11:00 – 24:00	6	54 – 69	4,3 – 7,1	SW	1010
18.11.2021	00:00 – 16:00	6-8	58 – 78	3,6 – 6,9	SW	1010
23.11.2021	12:00 – 16:00	3-4	65 – 66	4,0 – 8,0	WSW	1004



Rys. 2. Kierunki wiatru dla FW GŁUCHÓW. Serie pomiarowe odpowiadają kolejnym turbozespółom wiatrowym. Pora nocy 28.11.2021 r., godz.(05:00 – 06:00)

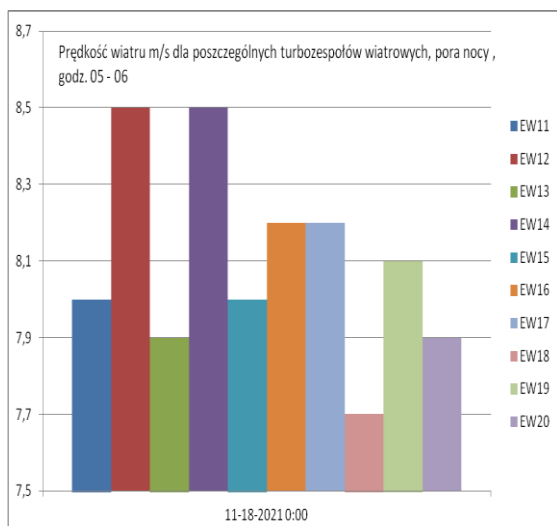
Metodyka referencyjna służy do wyznaczenia wartości poziomu hałasu pochodzącego z instalacji lub urządzeń znajdujących się na terenie jednego zakładu, wyrażonego wskaźnikami L_{AeqD} i L_{AeqN} , określonymi w art. 112a pkt 1 lit. b ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska [2], mającymi zastosowanie do ustalania i kontroli warunków korzystania ze środowiska w odniesieniu do jednej doby.

10. SPOSÓB WYKONYWANIA POMIARÓW

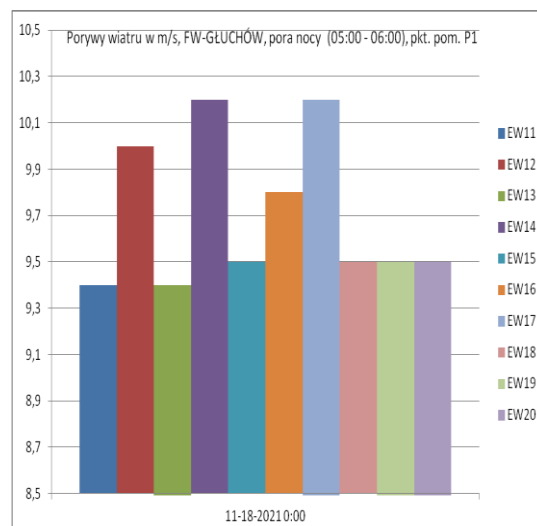
I sesja pomiarowa przebiegała w sposób ciągły synchroniczny w okresie 17-18

listopada 2021 r. i obejmowała punkty pomiarowe P1 – P4. II całodobowa sesja pomiarowa rejestracji dźwięku dla potrzeb oceny mocy akustycznej peryferyjnej elektrowni wiatrowej EW 20 przebiegała w dniach 23-24 listopada 2021 r. w pkt pom. P5.

W toku niniejszego projektu badawczego realizowano pomiar równoważnego poziomu dźwięku A [dB], w środowisku według charakterystyki korekcyjnej A, ze stałą czasową FAST. Pomiary przeprowadzono metodą pomiarów ciągłej rejestracji próbek elementarnych w czasie rzeczywistym dla pory dziennej jak i nocnej. Ww. źródła hałasu pracowały w sposób ciągły z obciążeniem zależnym od uwarunkowań technologicznych farmy wiatrowej oraz od warunków meteorologicznych zewnętrznych środowiskowych.



Rys. 3. Średnie wartości prędkości wiatru dla FW GŁUCHÓW z interwału 10 min. Serie pomiarowe odpowiadają kolejnym turbodozłom wiatrowym. Pora nocy 28.11.2021 r., godz. (05:00 – 06:00)



Rys. 4. Średnie wartości prędkości porywów wiatru dla FW GŁUCHÓW z interwału 10 min. Serie pomiarowe odpowiadają kolejnym turbodozłom wiatrowym. Pora nocy 28.11.2021 r., godz. (05:00 – 06:00)

Pomiaru i oceny poziomu tła akustycznego dokonano w punktach pomiarowych P1, P2, P4 w porze dnia i porze nocy. Dla pkt. pom. P3 tylko w porze dnia. Czynności pomiarów zrealizowano dokonując rejestracji próbek elementarnych dźwięku L_{Aki} , w dB, w zdefiniowanym rzeczywistym czasie odniesienia T_{rz} , pory dnia i pory nocy. Czas pomiaru elementarnego t_0 próbki dźwięku wynosił 1 sekundę. W zdefiniowanym, rzeczywistym, czasie odniesienia T_{rz} , pory dnia (06.00–22.00) i pory nocy (22.00–06.00) rozpatrywane wszystkie źródła dźwięku (10 zespołów turbogeneratorów), pracowały w sposób ciągły.

Z uwagi na oczywisty aspekt braku wystąpienia, w niniejszym przypadku, możliwości podjęcia pomiarów poziomu tła akustycznego w zdefiniowanym, referencyjnym punkcie pomiarowym dźwięku, czynności pomiaru i oceny poziomu tła akustycznego dokonano w miejscach usytuowania stanowisk pomiarowych wykorzystując dobowe pliki pomiarowe oraz aplikację IT, SVAN PC++, z wykluczeniem czynnika wpływu oddziaływań akustycznych innych źródeł dźwięku wyznaczając wskaźnik L_{95} charakteryzujący tło akustyczne (PN-ISO 1996-2 [6]). Całokształt analiz, interpretacji i ocen materiałów źródłowych badań dokonano w oparciu o aplikację IT, SVAN PC++, Copyright by T.M.© 2021, SVANTEK Sp. z o.o., Polska.

11. APARATURA POMIAROWA

Pomiary akustyczne w zdefiniowanych referencyjnych punktach pomiarowych dźwięku wykonano przy użyciu 3 precyzyjnych, całkujących mierników poziomu dźwięku i/lub analizatorów dźwięku 1 klasy dokładności, SVAN, typ 979 oraz dodatkowego zestawu tej

samej firmy typu 959 SVANTEK Sp. z o.o., Polska, w tym kalibratora, mikrofonów, osłon przeciwwietrznych i okablowania oraz źródeł energii (akumulatory).

Pomiarów warunków meteorologicznych w pkt. pom. dokonano przy użyciu profesjonalnej, podręcznej stacji pomiarowej warunków meteorologicznych: Barometru LB-580V2, Termohigrometru LB-701 z panelem odczytowym LB-702 oraz Anemometru wiatraczkowego EA-2113.

12. WYNIKI BADAŃ

Po przeanalizowaniu uzyskanych plików pomiarowych oprogramowaniem komputerowym SvanPC++, uzyskano dla poszczególnych punktów pomiarowych, wyniki historii czasowej dla pory dnia i pory nocy. Poniżej zaprezentowano obrazy zrzutów z ekranu komputera.

Dla punktów pomiarowych P1, P2, P3 i P4 wyznaczono :

1. wartość poziomu dźwięku L_{Aeq} dla czasu odniesienia pory dnia i pory nocy,
2. poziomy tła akustycznego dla pory dnia i pory nocy wyrażone wskaźnikiem L_{95} ,
3. zestawiono tabelarycznie uzyskane wartości poszczególnych wskaźników akustycznych.

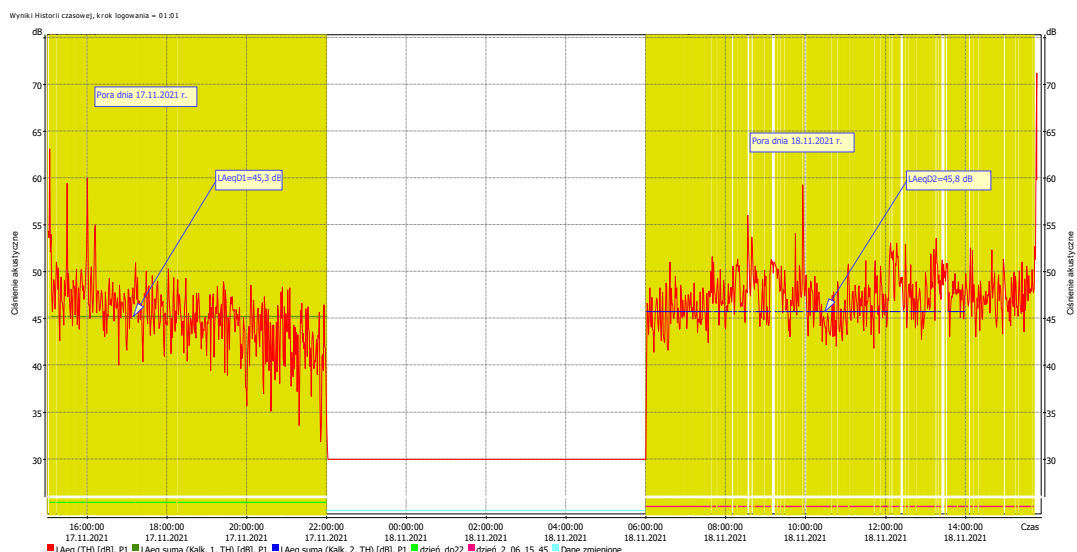
Dla pkt. pom. P1 i P2 zaprezentowano w kolejności historię zmian poziomów dźwięku w czasie rzeczywistym, odpowiednio dla pory dnia i pory nocy (Rys. 5-10 dla pkt. pom. P1 i Rys. 11-15 dla pkt. pom. P2) Po wstępnym przeanalizowaniu przebiegów pomiarowych, wyodrębniono zmiany poziomu dźwięku dla odpowiednich pór doby (porę dnia w godzinach 06-22 i porę nocy 22-06). Z uzyskanych pór doby, wyodrębniono 8 h najbardziej niekorzystnych, z punktu widzenia akustycznego, porę dnia oraz 1 h pory nocy z pośród 8 kolejnych godzin pory nocy. Tą 1 h pory nocy wybrano również jako najbardziej niekorzystną dla emisji dźwięku/hałasu w danym punkcie pomiarowym. W procesie tym wyodrębniono zmiany poziomu dźwięku do dalszej analizy, które nie były obarczone wpływem identyfikowanych, niepożądanych oddziaływań obcych źródeł dźwięku. W analizie tej wspierano się plikami dźwiękowymi zapisanymi w formacie .wav. W ocenie akustycznej rozpatrywano te godziny pory nocy, w których można było odseparować równoważny poziom dźwięku dla 1 h czasu odniesienia od poziomu tła akustycznego L_{95} , uzyskanego dla tego samego przedziału czasu odniesienia.

- Tab. 4, pkt pom. P1. Przedstawia równoważny poziom dźwięku L_{AeqD} dla badanych pór dnia z pomiarów 17-18.11.2021 r.
- Tab. 5, pkt pom. P1 zawiera równoważny poziom dźwięku L_{AeqN} dla każdej badanej 1 h pory nocy.

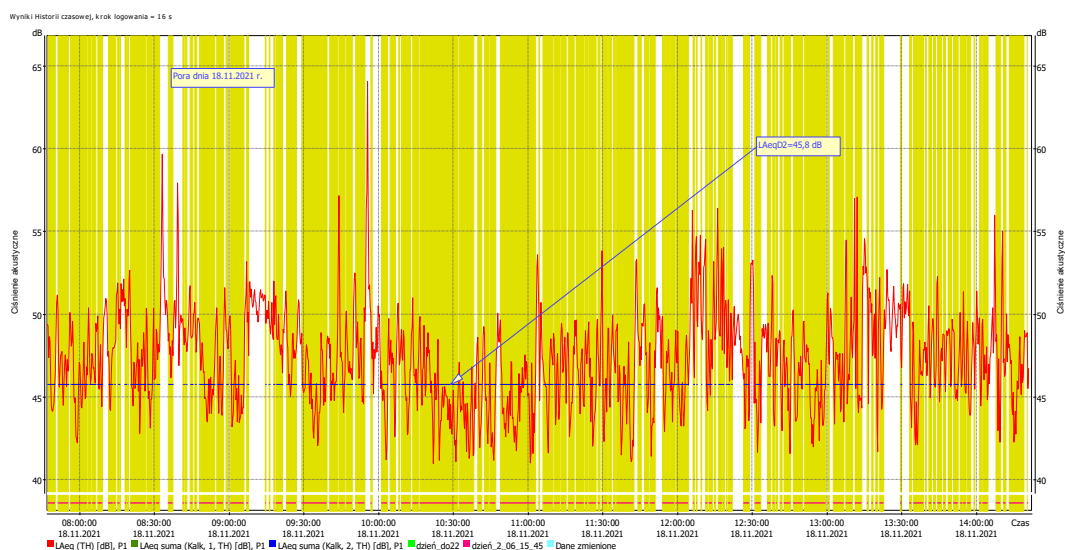
- Tab. 6, pkt pom. P2 przedstawia równoważny poziom dźwięku L_{AeqD} dla każdej badanej (8 h) pory dnia z sesji pomiarowej w dniach 17-18.11.2021 r.
- Tab. 7, pkt pom. P2 zawiera równoważny poziom dźwięku L_{AeqN} dla każdej badanej 1 h pory nocy z sesji pomiarowej w dniach 17-18.11.2021 r..

Ocenę warunków meteorologicznych dla Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW, na dzień 18.11.2021 r., w godz. (05:00 – 06:00), $H = 100$ m przedstawiają Rys. 5, 6 i 7. Dotyczy to jednej godziny, najbardziej niekorzystnej, ze względu na emisję hałasu do środowiska w porze nocy, z okresu badań, pkt pom. P1.

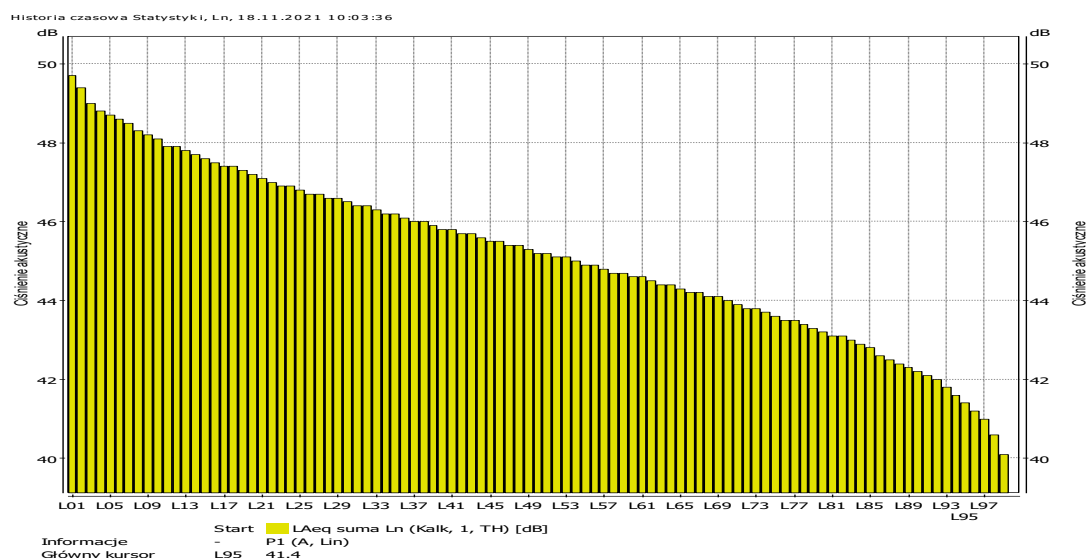
12.1. Pkt pom. P1, pora dnia



Rys. 3. Pkt pom. P1. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym dla pory dnia (06:00-22:00) w dniach 17-18.11.2021 r.



Rys. 4. Pkt pom. P1. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym dla wybranej pory dnia (06:00-22:00), tj. 18.11.2021 r.
Równoważny poziom dźwięku dla 8 h pory dnia osiągnął wartość $L_{AeqD} = 45,8$ dB

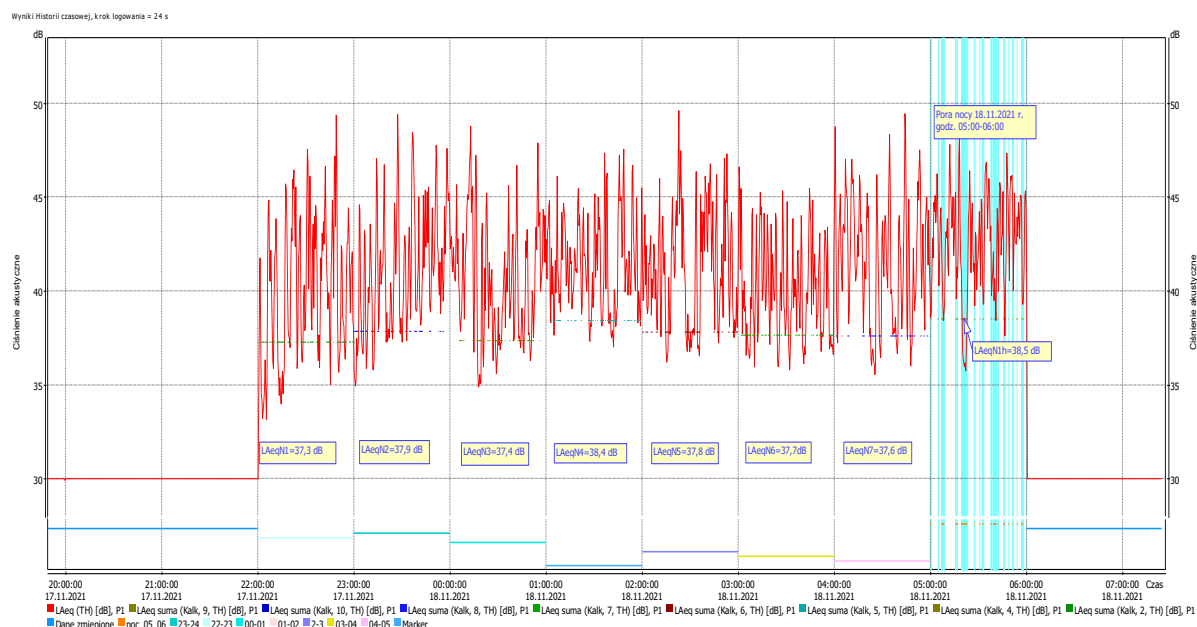


Rys. 5. Pkt pom. P1. Poziom tła akustycznego dla 8 h pory dnia
wyrażony wskaźnikiem statystycznym $L_{95} = 41,4$ dB

Tab. 3. Pkt pom. P1. Równoważny poziom dźwięku L_{AeqD} dla badanych pór dnia

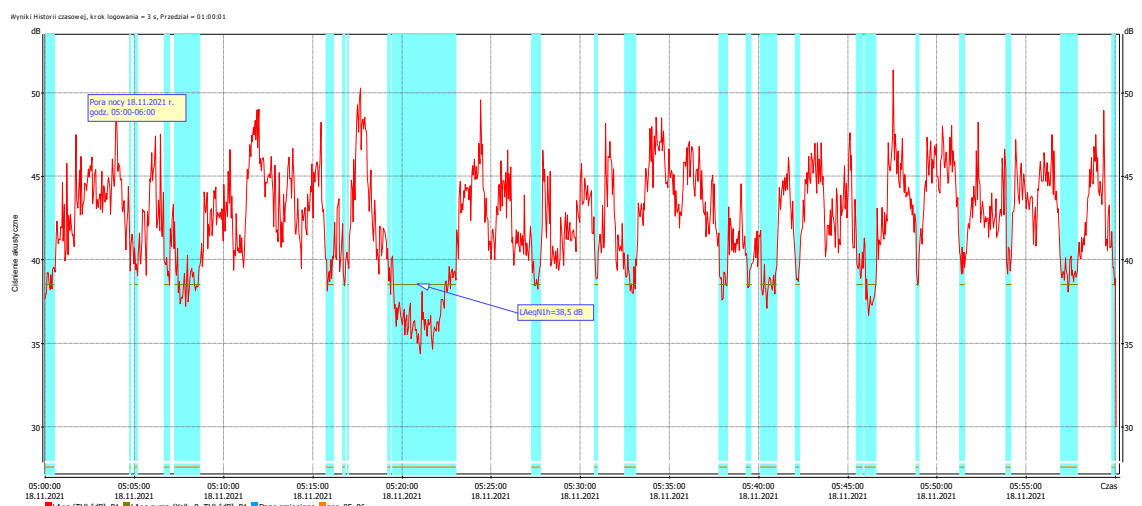
Nr	Data i czas początku	Czas trwania	Nazwa	P1 (A, Lin) L_{Aeq} suma [dB]
1	17.11.2021 15:00:48	07:00:00.000	Int.7 h, Zaznaczenie w bloku	45,3
2	18.11.2021 06:00:00	08:00:00.000	Int.8 h, Zaznaczenie w bloku	45,8

12.2. Pkt pom. P1, Pora nocy

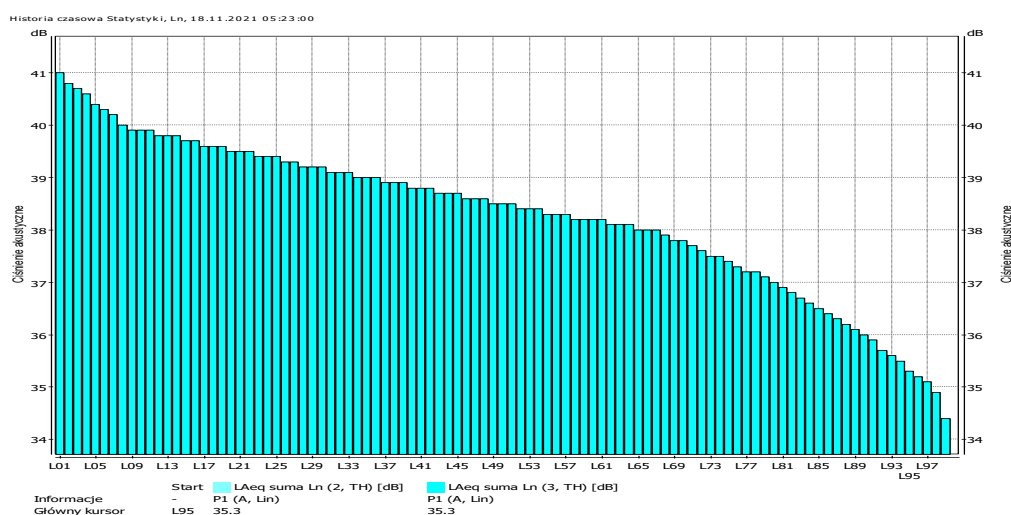


Rys. 6. Pkt pom. P1. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym
dla pory nocy (22:00-06:00) w dniach 17-18.11.2021 r.

Wybór 1 h najmniej korzystnej z 8 h pory nocy przyjętej do oceny akustycznej



Rys. 7. Pkt pom. P1. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym dla pory nocy (22:00-06:00), tj. 18.11.2021 r. Równoważny poziom dźwięku dla (1 h) najmniej korzystnej pory nocy (05:00-06:00) osiągnął wartość $L_{AeqD} = 38,5$ dB

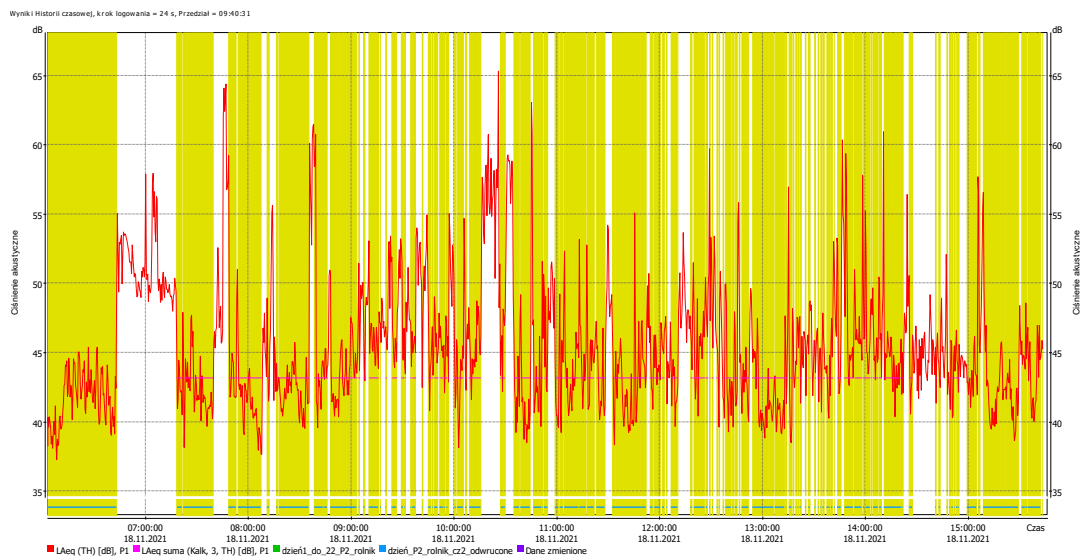


Rys. 8. Pkt pom. P1. Poziom tła akustycznego dla 1 h pory nocy wyrażony wskaźnikiem statystycznym $L_{95} = 35,3$ dB

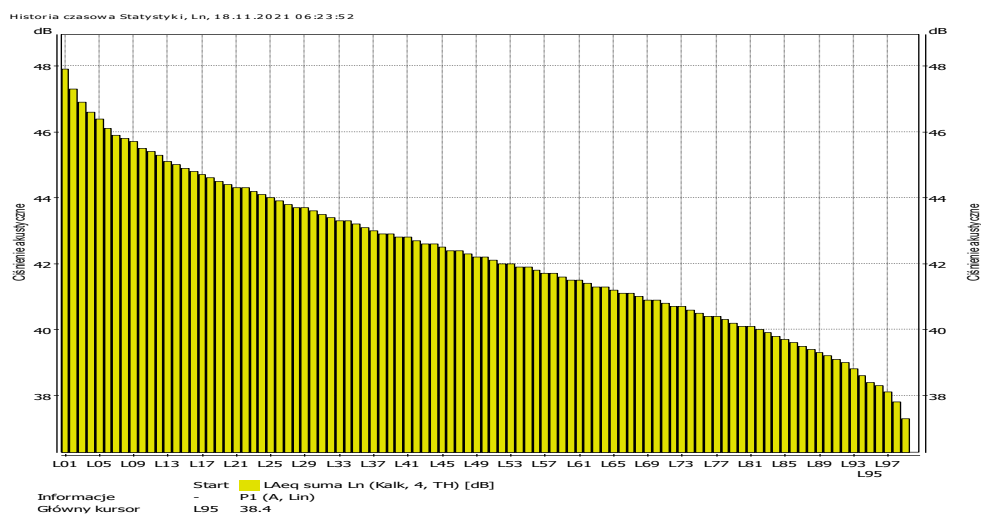
Tab. 4. Pkt pom. P1. Równoważny poziom dźwięku L_{AeqN} dla każdej badanej 1 h pory nocy

Nr	Data & czas początku	Czas trwania	Nazwa	P1 (A, Lin) L_{Aeq} suma [dB]
1	17.11.2021 22:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	30,0
2	17.11.2021 23:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37,9
3	18.11.2021 00:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37,4
4	18.11.2021 01:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	38,4
5	18.11.2021 02:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37,8
6	18.11.2021 03:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37,7
7	18.11.2021 04:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37,6
8	18.11.2021 05:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	38,5

12.3. Pkt pom. P2, pora dnia



Rys. 9. Pkt pom. P2. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym dla wybranej pory dnia (06:00-22:00), tj. 18.11.2021 r.
Równoważny poziom dźwięku dla 8 h pory dnia osiągnął wartość $L_{AeqD} = 45,8$ dB

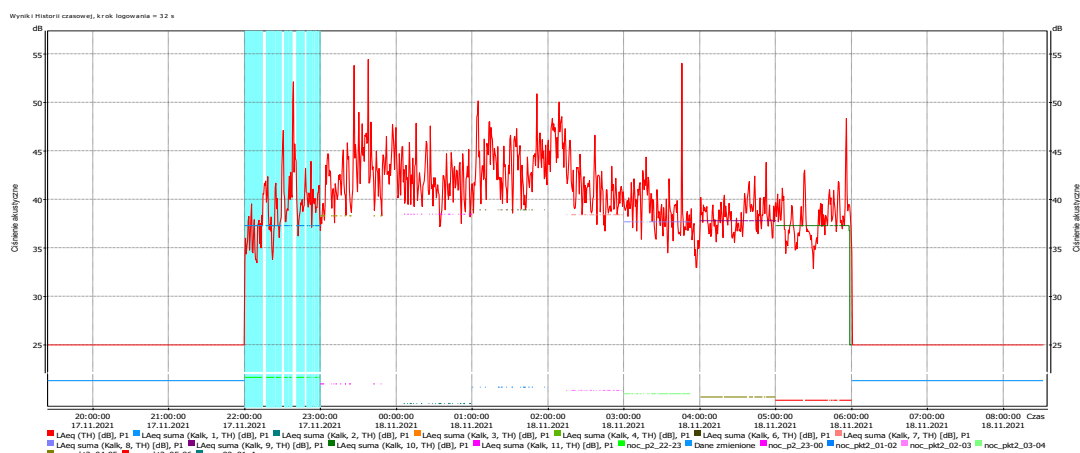


Rys. 10. Pkt pom. P2. Poziom tła akustycznego dla 8 h pory dnia (18.11.2021 r.) wyrażony wskaźnikiem statystycznym $L_{95} = 38,4$ dB

Tab. 5. Pkt pom. P2. Równoważny poziom dźwięku L_{AeqD} dla każdej badanej (8 h) pory dnia

Nr	Data & czas początku	Czas trwania	Nazwa	P2 (A, Lin)
				L_{Aeq} suma [dB]
1	17.11.2021 15:00:00	07:00:00.000	Int.7 h, Zaznaczenie w bloku	38.0
2	18.11.2021 06:00:00	08:00:00.000	Int.8 h, Zaznaczenie w bloku	43.0
3	18.11.2021 07:00:00	08:00:00.000	Int.8 h, Zaznaczenie w bloku	43.2

12.4. Pkt pom. P2, pora nocy



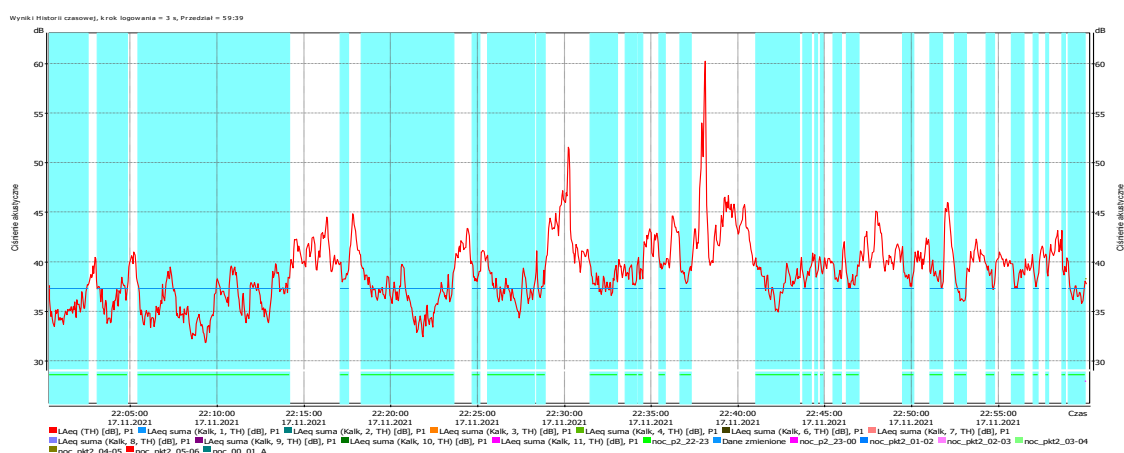
Rys. 11. Pkt pom. P2. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym dla pory nocy (22:00-06:00) w dniach 17-18.11.2021 r.

Wybór do oceny akustycznej 1 h najbardziej korzystnej z 8 h pory nocy

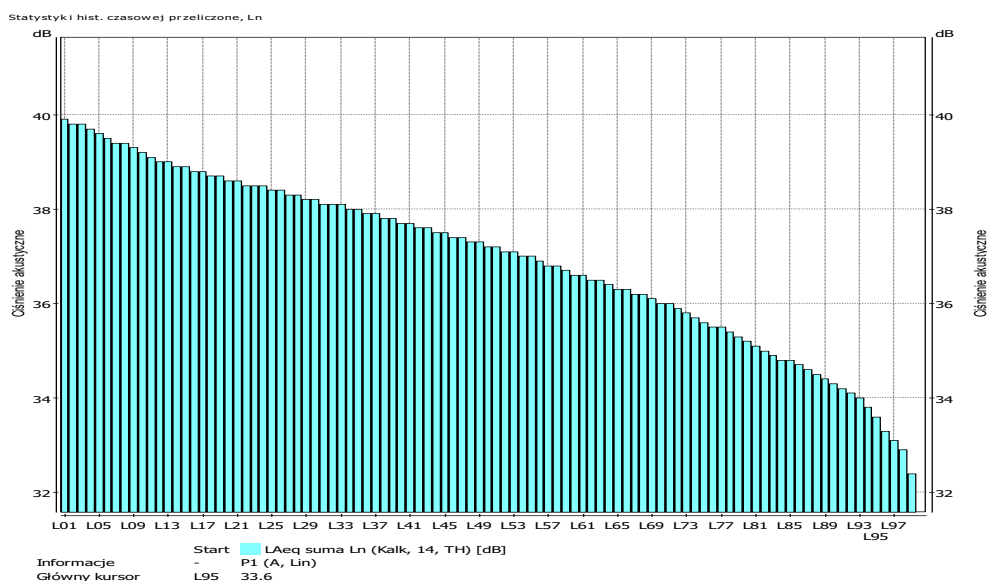
Tab. 6. Pkt pom. P2. Równoważny poziom dźwięku L_{AeqN} dla każdej badanej 1 h pory nocy

Nr	Data & czas początku	Czas trwania	Nazwa	P2 (A, Lin) L_{Aeq} suma [dB]
1	17.11.2021 22:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37.3
2	17.11.2021 23:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	38.3
3	18.11.2021 00:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	38.5
4	18.11.2021 01:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	38.9
5	18.11.2021 02:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	38.4
6	18.11.2021 03:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37.7
7	18.11.2021 04:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37.8
8	18.11.2021 05:00:00	01:00:00.000	Int.1 h, Zaznaczenie w bloku	37.3

12.5. Pkt pom. P2, pora nocy



Rys. 12. Pkt pom. P2. Historia zmian poziomu dźwięku w czasie rzeczywistym dla pory nocy (22:00-06:00), tj. 18.11.2021 r. Równoważny poziom dźwięku dla wybranej 1 h pory nocy (22:00-23:00) osiągnął wartość $L_{AeqD} = 37,3$ dB. Wybrana 1 h została ze względu na możliwość odseparowania mierzonego poziomu dźwięku od statystycznego poziomu tła akustycznego



Rys. 13. Pkt pom. P2. Poziom tła akustycznego dla 1 h pory nocy
wyrażony wskaźnikiem statystycznym $L_{95} = 33,6$ dB

13. WYNIKI ANALIZY HISTORII CZASOWEJ ZAREJESTROWANYCH SYGNAŁÓW DŹWIĘKOWYCH TURBOZESPOŁÓW WIATROWYCH

Poniżej zestawiono w tabelach wyniki równoważnych poziomów dźwięku A, dla czasów odniesienia T , wyrażone wskaźnikami hałasu L_{AeqD} i L_{AeqN} po korekcji tła akustycznego (Tab. 8 – pora dnia i Tab. 9 – pora nocy).

Tab. 7. Wyniki pomiarów. Pora dnia

Opis sytuacji akustycznej	Poziom dźwięku z tłem akustycznym L_{Aeqzm} [dB]	Poziom tła akustycznego L_{At} [dB]	Równoważny poziom dźwięku A, dla czasu odniesienia T , wyrażony wskaźnikiem hałasu L_{AeqD} po korekcji tła akustycznego [dB]	Kwalifikacja terenu
P1 (P1-D)	45,8	41,4	43,8	Teren zabudowy zagrodowej
P1-D-tło L_{95}	n.d.	41,4	41,4	Teren zabudowy zagrodowej
P2 (P2-D)	43,2	38,4	41,5	Teren zabudowy zagrodowej
P2-D-tło L_{95}	n.d.	38,4	38,4	Teren zabudowy zagrodowej
P3 (P3-D)	43,4	40,5	nieodróżnialny od tła akustycznego	Teren zabudowy zagrodowej
P3-D-tło L_{95}	n.d.	40,5	40,5	Teren zabudowy zagrodowej

Tab. 8. Wyniki pomiarów. Pora nocy

Opis sytuacji akustycznej	Poziom dźwięku z tłem akustycznym L_{Aeqm} [dB]	Poziom tła akustycznego L_{At} [dB]	Równoważny poziom dźwięku A, dla czasu odniesienia T, wyrażony wskaźnikiem hałasu L_{AeqD} po korekcji tła akustycznego [dB]	Kwalifikacja terenu
P1 (P1-N)	38,5	35,3	35,7	Teren zabudowy zagrodowej
P1-N-tło L_{95}	n.d.	35,3	35,3	Teren zabudowy zagrodowej
P2 (P2-N)	37,3	33,6	34,9	Teren zabudowy zagrodowej
P2-N-tło L_{95}	n.d.	33,6	33,6	Teren zabudowy zagrodowej

Zestawienie końcowe wyników pomiarów dźwięku/hałasu wyrażone wskaźnikami hałasu L_{AeqD} i L_{AeqN} zawiera Tab. 9.

Tab. 9. Zestawienie końcowe wyników pomiarów dźwięku/hałasu wyrażone wskaźnikami hałasu L_{AeqD} i L_{AeqN}

Lp	Punkt pomiaru	Wskaźniki hałasu	
		L_{AeqD} [dB]	L_{AeqN} [dB]
1	P1	43,8 ± 1,8	35,7 ± 2,0
2	P2	41,5 ± 1,8	34,9 ± 2,0
3	P3	nieodróżnialny od tła akustycznego	--

14. WYNIKI ANALIZY HISTORII CZASOWEJ ZAREJESTROWANYCH SYGNAŁÓW DŹWIĘKOWYCH TURBOZESPOŁU WIATROWEGO EW20 ORAZ WSKAŹNIKI DŹWIĘKU/HAŁASU UZYSKANE NA DRODZE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Zestawienie porównawcze uzyskanych wyników pomiarów dla potrzeb oszacowania mocy akustycznej wybranego turbozespołu wiatrowego EW20, w funkcji odległości, przedstawia Tab. 10.

Tab. 10. Zestawienie wyników rzeczywistych pomiarów i wyników symulacyjnych w pkt. pom. P4 i P5

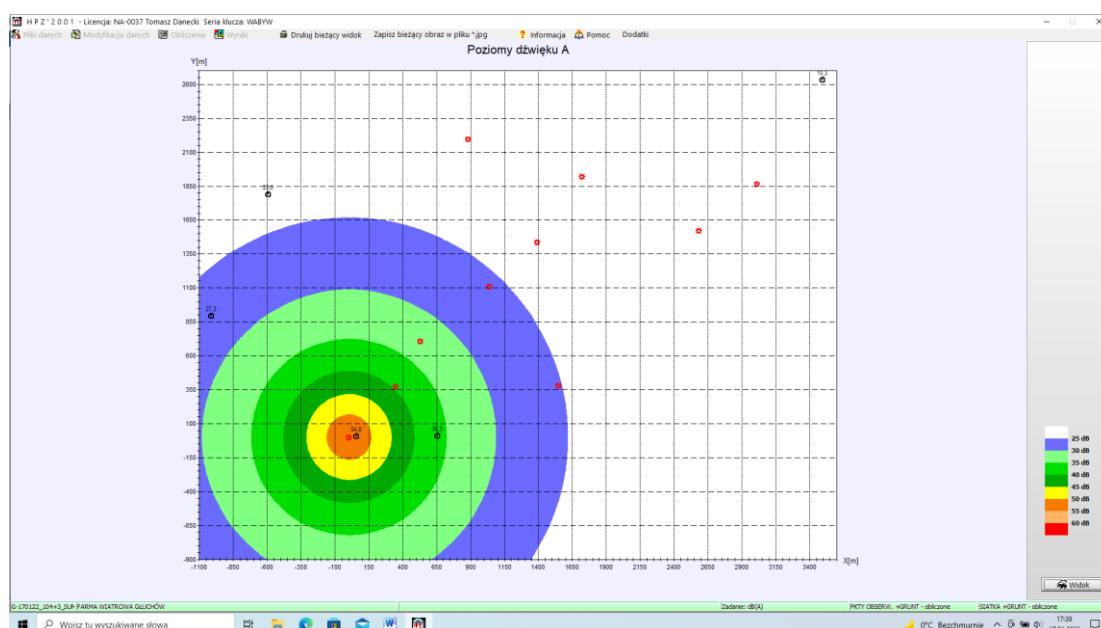
Lp	Punkt pomiaru	Wskaźniki dźwięku/hałasu		
		L_{AeqD} [dB]	L_{AeqN} [dB]	Wyznaczony komp. wg. PN-ISO 9613-2
1	P4	36,1_1dzień_8h 41,8_2dzień_8h	40,0_1noc_22-23 42,7_2noc_01-02	43,8
2	P5	53,6	55,8_noc23-24	56,4

Graficzny obraz omawianej sytuacji przedstawia Rys. 12 (punkt P4 – przy turbinie i P5 na terenie GPZ).

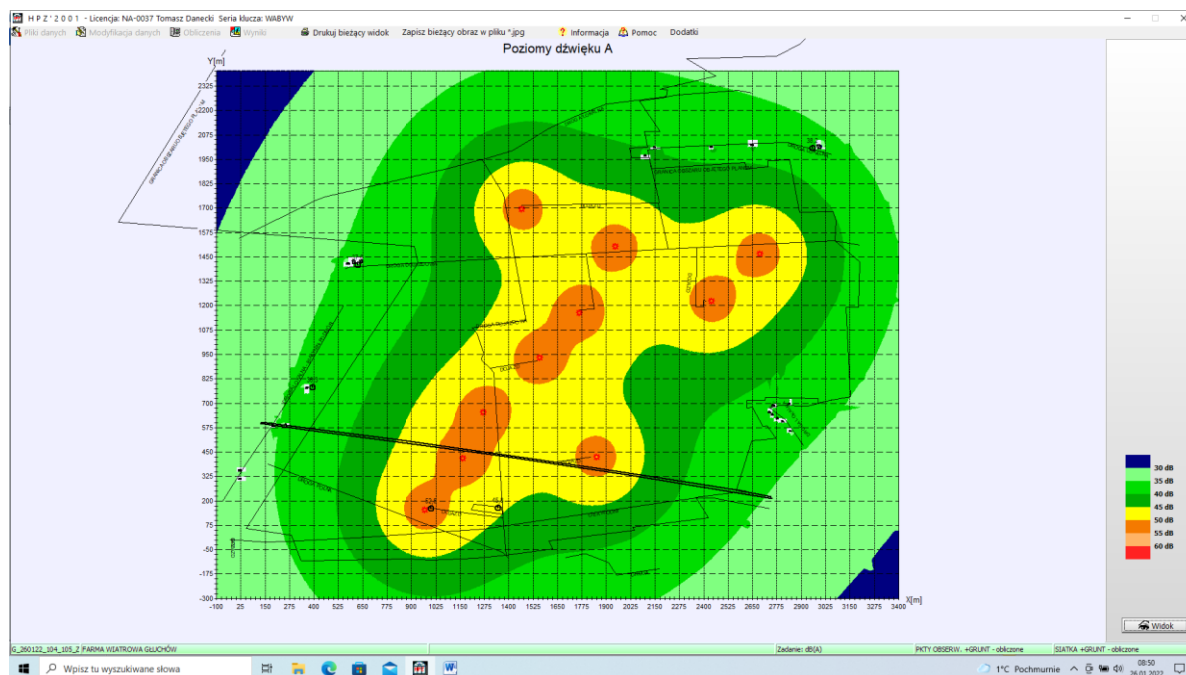
15. MODELOWANIE AKUSTYCZNYCH ROZKŁADÓW PRZESTRZENNYCH SYGNAŁÓW
GENEROWANYCH PRZEZ TURBINY WIATROWE, NA PODSTAWIE SZACUNKOWYCH
WARTOŚCI MOCY AKUSTYCZNEJ TURBOZESPOŁÓW WIATROWYCH

Wartość poziomu mocy akustycznej – wyznaczoną dla pojedynczej turbiny – wykorzystano w obliczeniach symulacyjnych rozkładu poziomu dźwięku A wokół badanej farmy wiatrowej. Obliczenia wykonano w programie HPZ'2001 Windows: Wersja: marzec'2012 + GRUNT, na podkładzie mapy miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego dla obszaru Farmy Wiatrowej Głuchów, podczas pracy wszystkich turbin. W obliczeniach przyjęto, że każda z turbin wiatrowych jest punktowym źródłem dźwięku, o poziomie mocy akustycznej $L_{NA} = 104$ dB, usytuowanym na wysokości $H = 105$ m odpowiadającej wysokości wieży turbiny.

W obliczeniach nie uwzględniono wpływu kierunku wiatru na rozkład poziomu dźwięku jak również poziomu tła akustycznego. Na podkładzie mapy farmy wiatrowej wyliczono i w odpowiedniej skali przedstawiono zasięgi stref poziomów dźwięku A, dla wyodrębnionej elektrowni wiatrowej EW20, jak również podczas pracy wszystkich 10 turbin VESTAS V90. W Tab. 10 zestawiono obliczone równoważne poziomy dźwięku w poszczególnych punktach obserwacji. Na mapach tych (Rys. 16 i Rys. 17) naniesiono również wartości poziomów dźwięku uzyskane z obliczeń, w poszczególnych punktach referencyjnych. Zasięgi stref akustycznych oraz wartości uzyskane z rzeczywistych badań poziomu dźwięku posłużyły do oceny akustycznej wpływu farmy wiatrowej na klimat akustyczny środowiska.

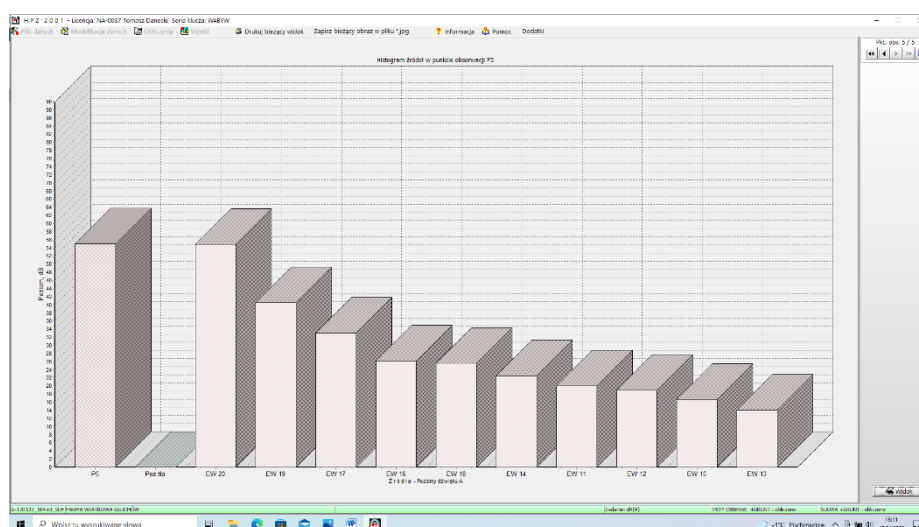


Rys. 14. Strefy równego poziomu dźwięku elektrowni wiatrowej EW20 uzyskane na drodze pomiarowej i symulacji komputerowej opartej o normę PN-ISO 9613-2



Rys. 15. Strefy równego poziomu dźwięku dla Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW

Rys. 18 prezentuje histogram udziału poszczególnych źródeł (elektrowni wiatrowych) na wynik końcowy poziomu dźwięku w pkt. pom. P5.



Rys. 16. Histogram udziału poszczególnych źródeł w pkt. pom. P5

W Tab. 11 zestawiono równoważne poziomy dźwięku A w zadanych punktach obserwacji przy wszystkich pracujących elektrowniach wiatrowych, uzyskane metodą obliczeniową, wykorzystując normę PN-ISO 9613-2.

Obliczona wartość poziomu mocy A turbiny wiatrowej jest zgodna z danymi zawartymi w specyfikacji turbozespołu wiatrowego VESTAS V90–1.8/2.0 MW 50 Hz [7], z których wynika, że dla prędkości wiatru 4,4 – 18,9 m/s na wysokości gondoli 105 m npt poziom mocy akustycznej A jest zawarty w przedziale od 92,9 dB do 104,0 dB. W przypadku prowadzonych

przez Instytut Energetyki w Warszawie badań akustycznych i obliczeń symulacyjnych, poziom mocy dla pojedynczego turbozespołu wiatrowego uzyskał wartość 104 dB.

Tab. 11. Równoważny poziom dźwięku A w zadanych punktach obserwacji przy wszystkich pracujących elektrowniach wiatrowych					
Lp.	Symbol	x [m]	y [m]	z [m]	L _A [dB]
1	P1	-1011,0	891,9	4,0	32,6
2	P2	-592,9	1787,4	4,0	32,7
3	P3	3494,3	2634,2	4,0	34,2
4	P4	655,9	11,9	4,0	43,3
5	P5	58,7	7,1	4,0	55,1

Z analizy propagacji hałasu wokół Farmy Wiatrowej Głuchów (patrz Rys. 18), przeprowadzonej dla omówionych warunków atmosferycznych oraz obowiązujących uwarunkowań prawnych wynika, że w tym przypadku hałas generowany przez turbiny nie jest uciążliwy dla terenów zabudowy zagrodowej. Najbliższe tereny zabudowy mieszkalnej zlokalizowane są w odległości 885 m od najbliższej turbiny.

16. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań oddziaływań akustycznych Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW, składającej się z 10 turbozespołów wiatrowych VESTAS V90, każdy o mocy 2 MW. Generowane dźwięki wszystkich pracujących elektrowni wiatrowych, rejestrowano 4. zestawami pomiarowymi firmy SVANTEK. I sesja pomiarowa przebiegała w sposób ciągły synchroniczny w 2 punktach pomiarowych P1 i P2, usytuowanych na terenach podlegających ochronie przed hałasem (tereny zabudowy zagrodowej). Trzecim zestawem pomiarowym rejestrowano dźwięki również w sposób ciągły, w ograniczonym czasie (10 min), w pkt. pom. P3. Dla potrzeb oszacowania mocy akustycznej pojedynczego zewnętrznego (peryferyjnego) turbozespołu wiatrowego, przeprowadzono w pkt. pom. P5 II całodobową sesję pomiarową rejestrującą dźwięki przy analogicznych warunkach wietrzności jak w sesji I. W punkcie pom. P4, dodatkowym zestawem pomiarowym firmy SVANTEK rejestrowano dźwięki turbozespołu wiatrowego EW20, umiejscowionego w odległości 390 m od źródła.

Niniejsza ocena akustyczna obejmowała rejestrację dźwięków słyszalnych (20 Hz-20 kHz) propagowanych bezpośrednio z badanych obiektów. Ocenę akustyczną wpływu farmy wiatrowej na klimat akustyczny, przeprowadzono w ujęciu obowiązującego prawa, w sposób podany w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 7 września 2021 r. [1].

Nadmienić należy, że badania te miały charakter ciągły (dobowy) obejmujący zarówno porę dnia, jak i porę nocy. Warunki meteorologiczne rejestrowano w sposób ciągły na poszczególnych turbozespołach wiatrowych (dane pochodzące od Zarządzającego Farmą Wiatrową). W ocenie akustycznej uwzględniono kierunki, prędkości wiatrów i temperaturę powietrza w środowisku.

Na drodze symulacji numerycznej (PN-ISO 9613-2) i na podstawie przeprowadzonych badań, oszacowano moc akustyczną wytypowanej elektrowni wiatrowej. Po uzyskaniu wyników badań mocy akustycznej oraz poziomów równoważnych w punktach referencyjnych wokół farmy turbozespołów wiatrowych, wygenerowano 5 dB zasięgi stref akustycznych propagacji dźwięku dla całego kompleksu 10 elektrowni wiatrowych. Ocena ta odzwierciedla najmniej korzystną sytuację akustyczną, ww. Farmy Wiatrowej GŁUCHÓW.

Przeprowadzony projekt badawczy pozwala wysnuć następujące wnioski:

1. Przedstawiony sposób dokumentowania ewentualnego stopnia przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, powodowanego przez farmę wiatrową, uwidacznia zalety przyjętej metody.
2. Zarejestrowanie poziomów dźwięku/hałasu w punktach pomiarowych (przy zmiennej sile i kierunkach wiatru) jest bardziej wiarygodne przy posiadaniu kilku zestawów pomiarowych i wydłużeniu czasu obserwacji.
3. Synchroniczna rejestracja zmian poziomu dźwięku w wielu punktach pomiarowych, przy zmiennych uwarunkowaniach meteorologicznych, odzwierciedla rzeczywistą propagację dźwięku w otwartej przestrzeni.
4. „Fotograficzne” ujęcie propagacji i immisji dźwięku w wyznaczonych punktach pomiarowych, w postaci zbioru danych oraz zastosowanie aplikacji SvanPC++, umożliwia wyznaczenie niezbędnych równoważnych wskaźników akustycznych (L_{AeqD} , L_{AeqN} , L_{95D} , L_{95N} , ...) służących do oceny uciążliwości akustycznej badanego obiektu.
5. Ocena zjawisk akustycznych (przy zaprezentowanym postępowaniu) jest bardziej miarodajna. Ujęte są aspekty zarówno akustyczne, warunki meteorologiczne i technologiczne badanego obiektu.

17. LITERATURA

1. Dz. U. z dnia 21 listopada 2019 r. Poz. 2286, OBWIESZCZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 15 października 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody

2. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo Ochrony Środowiska (tekst jednolity Dz. U. 2017, Poz. 519, z późn. zm.).
3. Załącznik nr 7 z dnia 7 września 2021 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody, (Dz. U. z 2019, Poz. 2286, z późn. zm.).
4. Decyzja Wójta Gminy Głuchów nr 5/208 r. z dnia 5 września 2008 r. o środowiskowych uwarunkowaniach zgody na realizację przedsięwzięcia polegającego na budowie „Farmy elektrowni wiatrowych GŁUCHÓW” wraz z urządzeniami do przesyłania energii elektrycznej i infrastrukturą towarzyszącą wynoszą
5. Procedura badawcza PB-EOS Nr 03, wyd. Instytut Energetyki, Pracownia Oddziaływań Środowiskowych i Ochrony Przeciwpzepięciowej
6. Norma PN-ISO 9613-2 Akustyka – Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczeń
7. Specyfikacja elektrowni wiatrowej firmy VESTAS – General Specification V90–1.8/2.0 MW 50 Hz VCS 2011-08-26

XLVIII Szkoła Zimowa
Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk, 2020-02-24 – 28

XLIX Szkoła Zimowa
Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk, 2022-02-28 – 03-04

INDEKS NAZWISK AUTORÓW

Lp.	Autor	Strona
1.	KACPEREK Mateusz	95
2.	KALWASIŃSKI Krzysztof	95
3.	KWARTRNIK Michał	85
4.	DANECKI Ryszard	95
5.	ŁADA Krzysztof	43, 85
6.	MIKULSKI Witold	7, 49
7.	MORZYŃSKI Leszek	73, 85
8.	NURZYŃSKI Jacek	67
9.	PLEBAN Dariusz	73
10.	PODLEŚNA Marlena	85
11.	RADOSZ Jan	73
12.	SZCZEPAŃSKI Grzegorz	43, 73
13.	ŚMIETANKA Hubert	95
14.	WŁUDARCZYK Anna	85

DODATEK 1

Z historii

**XLVIII Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
Szczyrk 2020**

foto – Roman Bukowski



Otwarcie jubileuszowej IOS oraz Szkół Zimowych, Szczecin 2020
Od lewej: prof. Franciszek Witos, prof. Tadeusz Pustelny, dr hab. Edward Zorębski, autor.



Jubileuszowe gratulacje odbiera
prof. Tadeusz Pustelny



Jubileuszowe gratulacje składa prof.
Wiesław Woliński



Jubileusz uświetnił występ śpiewaków operowych



Prof. Jacek Nurzyński przewodniczy sesji poświęconej ekologii akustycznej.
Prelegentem jest dr. hab. inż. Janusz Piechowicz.



Uczestnicy sesji poświęconej ekologii akustycznej w ramach SZ AŚiW



Prelegentka SZ AŚiW dr inż. Dorota Czopek



Prelegent SZ AŚiW prof. Janusz Kompała



Otwarcie szkolenia organizowanego przez firmę SVANTEK



Od prawej: organizator szkolenia Karol Sałagan, prelegent dr inż. Andrzej Chyla.

DODATEK 2

PROGRAM

**XLIX SZKOŁY ZIMOWEJ
AKUSTYKI ŚRODOWISKA I WIBROAKUSTYKI**

SZCZYRK

2022-02-28 – 03-04

XLIX Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki

SZCZYRK 2022-02-28 ÷ 03-04

2022-02-28 – Poniedziałek

14:00	Obiad
16:00-16:10	Uroczyste otwarcie 50 SZ AFiK, XLIX SZ AŚiW, 16th IOS'2022
16:10-16:45	Sesja jubileuszowa 50 SZ AFiK Przewodniczący: prof. Franciszek Witos
16:10-16:30	<i>Referat plenarny:</i> <u>Tadeusz PUSTELNY</u> , Roman J. BUKOWSKI <i>The Golden Jubilee of the 50th WINTER SCHOOL ON WAVE AND QUANTUM ACOUSTICS – historical reminiscences</i>
16:30-16:35	<u>Antoni ŚLIWIŃSKI</u> , (online) <i>Address by the Chairman of the Honorary Committee</i>
16:35-16:45	<i>Other speeches</i>
16:45-17:30	Przerwa kawowa
17:30-18:15	“ALTRA VOLTA” - MUSIC GLANCE
18:30-	Kolacja
20:00-...	50 lat minęło – WIECZÓR WSPOMNIENI Przewodnicząca: prof. Marzena Dzida Grażyna GRELOWSKA: „Dzieci i narty” Krzysztof J. OPIELIŃSKI, Tadeusz GUDRA: „Przegląd udziału zespołu ultradźwiękowego z Politechniki Wrocławskiej w konferencjach Winter School on Wave and Quantum Acoustics” Bogumił B. J. LINDE: „Akustyka Molekularna – badania w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Gdańskiego i ich prezentacje na Szkołach Zimowych” Jerzy BODZENTA: „Fotoakustyka i fototermika – badania w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej i ich prezentacje na Szkołach Zimowych” Tomasz BOCZAR: „Badania naukowe prowadzone na Politechnice Opolskiej w obszarze diagnostyki transformatorów z wykorzystaniem metod nieniszczących” Jacek GLIŃSKI: „50 lat akustyki molekularnej we Wrocławiu” Adam KAWALEC: „Udział pracowników naukowych WAT w Szkołach Zimowych” Arkadiusz JÓZEF CZAK: „Ultradźwięki jako narzędzie badań ośrodków ciekłych i nanomateriałów” Edward ZOREŃSKI, Marzena DZIDA: „40 lat badań akustycznych cieczy w Instytucie Chemii UŚ w Katowicach i ich prezentacja na Szkołach Zimowych” Zbigniew RANACHOWSKI: „Związki Oddziału Warszawskiego PTA ze Szkołą Zimową” Lucyna LENIOWSKA: „Przegląd zagadnień prezentowanych przez członków PTA – Oddział Rzeszów na Zimowej Szkole” Roman BUKOWSKI: „Szkola Zimowa AFiK w fotografiach”

2022-03-01 – Wtorek	
8:00-9:00	Śniadanie
13:00	Obiad
14:30-14:40	Otwarcie XLIX Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki
14:40-16:30	Sesja konferencyjna: Akustyka pomieszczeń – przewodniczy dr hab. Dariusz Pleban
14:40-15:25	Jacek NURZYŃSKI <i>The acoustic effect of windows installed in a lightweight frame façade</i>
15:25-16:10	Witold MIKULSKI <i>Sound masking in the open space office rooms – evaluation criteria for sound uniformity, masking sources</i>
16:10-16:30	Czas wolny
16:30-17:00	Przerwa kawowa
17:00-20:00	Czas wolny
20:00-...	Uroczysta kolacja – bankiet <i>W początkowej części występ zespołu jazzowego „CSW Trio”</i>

2022-03-02 – Środa	
8:00-9:00	Śniadanie
13:00	Obiad
14:30-16:30	Sesja konferencyjna <i>Ultradźwięki i metody numeryczne w akustyce</i> – przewodniczy prof. Jacek Nurzyński
14:30-15:10	Marlena PODLEŚNA, Leszek MORZYŃSKI, Krzysztof ŁADA, Anna WŁUDARCZUK, M. KWARTNIK <i>Ultrasonic haptic technique – operation, expected applications and assessment of the risk of ultrasonic noise</i>
15:10-15:50	Krzysztof ŁADA, Grzegorz SZCZEPAŃSKI <i>Numerical study of an acoustic labyrinth metamaterial</i>
15:50-16:30	Leszek MORZYŃSKI, Anna WŁUDARCZYK, Krzysztof ŁADA <i>Development of the SAFE website in the context of changes in the Polish labour market on the example of noise hazards</i>
16:30-17:00	Przerwa kawowa
17:00-19:00	Czas wolny
19:00-20:00	Kolacja
20:00-...	Sesja posterowa IOS, SZ AFiK

2022-03-03 – Czwartek	
8:00-9:00	Śniadanie
13:00	Obiad
15:00-16:30	Sesja konferencyjna Hałas turbin wiatrowych – przewodniczy dr hab. Witold Mikulski
15:00-15:40	Dariusz PLEBAN, Grzegorz SZCZEPAŃSKI, Jan RADOSZ, Leszek MORZYŃSKI <i>A laboratory stand for wind turbine noise reproduction</i>
15:40-16:20	Hubert ŚMIETANKA <i>Ocena oddziaływania akustycznego farmy wiatrowej Gluchów podczas jej eksploatacji</i>
16:20-16:30	Zakończenie XLIX SZ AŚiW
16:30-17:00	<i>Przerwa kawowa</i>
17:00-19:00	<i>Czas wolny</i>
19:00	Kolacja

2022-03-04 – Piątek	
8:00	Śniadanie

