



Szkoła Nauk Ścisłych
Wydział Fizyki i Astronomii
Katedra Akustyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Metody redukcji hałasu turbin wiatrowych ze szczególnym uwzględnieniem metod „miękkich”

Wind turbine noise reduction methods with particular emphasis on „soft” reduction methods

ROZPRAWA DOKTORSKA

DOCTORAL THESIS

Maciej Jan Buszkiewicz

Promotorzy:

Prof. dr hab. Andrzej Wicher

Prof. dr hab. Roman Gołębiowski

Poznań, wrzesień 2025

Podziękowania

W pierwszej kolejności chciałem podziękować promotorom: prof. UAM dr hab. Andrzejowi Wichrowi i prof. UAM dr hab. Romanowi Gołębiewskiemu – za życzliwą pomoc, dzielenie się wiedzą z zakresu psychoakustyki i akustyki środowiskowej, słowa zachęty na każdym etapie mojej pracy badawczej oraz liczne, bezcenne wskazówki podczas pisania niniejszej rozprawy.

Dziękuję prof. dr. hab. Annie Preis za podzielenie się wiedzą i doświadczeniem na temat hałasu turbin wiatrowych oraz za zaproszenie do projektu HETMAN, w którym realizowałem zadania blisko związane z tematyką mojej pracy badawczej.

Dziękuję członkom projektu HETMAN, pracownikom Katedry Akustyki UAM, pracownikom firmy AkustiX i pracownikom Centrum Neuronauki Poznawczej, którzy na każdym etapie prowadzonych przeze mnie badań byli gotowi pomóc mi w ich realizacji, służyć radą i dobrym słowem. W szczególności dziękuję Annie Pastusiak, Janowi Felcynowi i Robertowi Gogolowi, którzy pomagali odnaleźć się w skomplikowanym świecie Nauki.

Dziękuję również wszystkim osobom, które zdecydowały się wziąć udział w moich „dziwnych” badaniach, za zaangażowanie, zainteresowanie i doping moich starań.

Najważniejsze podziękowania kieruje do mojej żony Adrianny i synka Ignasia - za okazaną miłość, pomoc i cierpliwość podczas długiego czasu doktoratu i trudnego okresu przygotowania tej rozprawy.

Oświadczenie

Prezentowana rozprawa dotyczy zagadnienia hałasu turbin wiatrowych, który w Polsce jest tematem kontrowersyjnym. Zamierzeniem Autora niniejszej pracy nie jest ocena technologii wiatrowej ani opowiadanie się za żadną stroną sporu politycznego czy społecznego. Przeprowadzone badania miały na celu poszerzenie wiedzy związanej z ochroną przed hałasem, a wnioski płynące z wyników mają charakter wyłącznie naukowy.

W trakcie badań opisanych w niniejszej rozprawie Autor był zaangażowany w projekt NOR/POLNOR/Hetman/0073/2019, „*Healthy society-towards optimal management of wind turbines' noise*” akronim: „HETMAN”. Autor był Wykonawcą w Work Package 5 – Wind turbine noise reduction. Do zadań Work Package 5 należało stworzenie Katalogu rozwiązań redukujących hałas, w który włączono metody opracowywane podczas badań opisanych w tej rozprawie.

Spis treści

Streszczenie w języku polskim	7
Summary	8
Streszczenie w języku niespecjalistycznym	9
Spis skrótów i pojęć	10
Dorobek naukowy	12
I Wstęp.....	14
1. Wprowadzenie	14
2. Cele i zakres pracy.....	16
3. Opis struktury pracy	17
II Przegląd literatury i obecny stan wiedzy	19
4. Energetyka wiatrowa.....	19
5. Turbina wiatrowa jako źródło hałasu.....	29
6. Regulacje prawne związane z hałasem turbin wiatrowych	39
7. Wpływ hałasu na zdrowie ludzi	44
8. Metody oceny hałasu turbin wiatrowych	52
9. Metody redukcji hałasu turbin wiatrowych	55
III Hipotezy badawcze	61
10. Hipoteza 1	61
11. Hipoteza 2	62
12. Hipoteza 3	63
IV Metodyka badań i aparatura	64
13. Pomiar terenowe i nagrania bodźców.....	64
14. Etap I: Eksperymenty psychoakustyczne związane z maskowaniem hałasu turbin wiatrowych.....	71
15. Etap II: Wpływ zastąpienia widoku źródła na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych.....	93
16. Etap III: Ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych w warunkach kontrolowanych.....	103
V Wyniki badań	106
17. Etap I - wyniki eksperymentów 1 i 2: wpływ hałasu autostrady (i wiatru) na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych.....	106
18. Etap II - wyniki eksperymentu 3: udział czynników wzrokowych w ocenie dokuczliwości hałasu turbiny wiatrowej.....	116

19.	Etap III - wyniki eksperymentu 4: obiektywna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych	119
VI	Dyskusja wyników.....	120
20.	Dyskusja nad wynikami etapu I	120
21.	Dyskusja nad wynikami etapu II.....	122
22.	Dyskusja nad wynikami etapu III.....	123
VII	Wnioski.....	125
23.	Wnioski płynące z etapu I.....	125
24.	Wnioski płynące z etapu II.....	127
25.	Wnioski płynące z etapu III	129
VIII	Podsumowanie	131
IX	Bibliografia	135
	Załączniki	150
	Artykuł 1: Cognitive neuroscience approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions	151
	Artykuł 2: Method for determining the threshold of wind turbine noise masking by highway noise as function of distance	168

Streszczenie w języku polskim

Rozprawa porusza zagadnienie dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych (*HTW*) i metod jego redukcji przy pomocy, tzw. „miękkich metod redukcji” (*MMR*). Celem *MMR* jest zmiana percepcji hałasu i zmniejszenie dokuczliwości bez koniecznego obniżenia poziomu *HTW* w punkcie immisji. Zdefiniowano i przetestowano trzy hipotezy badawcze: (H1) *HTW* może być zamaskowany przez hałas drogowy (*HD*) oraz hałas drogowy składową wiatru (*HD+W*); (H2) dokuczliwość *HTW* można zmniejszyć poprzez zastąpienie widoku turbiny wiatrowej; (H3) możliwość dokładnej oceny dokuczliwości jest możliwa w warunkach kontrolowanych, po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych.

Przeprowadzone prace badawcze podzielono na 3 etapy powiązane z każdą z hipotez. W eksperymentach wykorzystywano bodźce akustyczne przygotowane z wykorzystaniem tzw. funkcji przejścia (na podstawie metodyki Nord2000), umożliwiając parametryzację odległości i spójne modelowanie propagacji. Prezentacje audiowizualne realizowano w środowisku VR. W celu eliminacji wpływu czynników pozaakustycznych wykorzystano metody oparte na wskaźnikach neurokognitywnych: badanie EEG, test SART, macierze MaRs-IB i kwestionariusz DASS.

W Etapie I wyznaczono progi dyskryminacji dokuczliwości *HTW* na tle *HD/HD+W*. Średnie wartości SNR przy których badani przestawali różnicować dokuczliwość *HTW* były ujemne (-15 do -8 dB), co wskazuje na ograniczoną skuteczność maskowania; obecność komponentu wiatru w maskerze nie zmieniała istotnie wyników. Oceny dokuczliwości wg skali IC BEN nie zależały istotnie ani od poziomu maskera, ani od obecności wiatru. W Etapie II w VR zbadano wpływ zastąpienia turbiny drzewami oraz odległości turbiny od słuchacza (jako ekwiwalentu poziomu) na dokuczliwość. Zmiana odległości ujawniła istotny efekt (spadek ocen dokuczliwości wraz ze zmniejszaniem się poziomu źródła), natomiast stopień zastąpienia turbiny okazał się być czynnikiem nie istotnym i nie wchodził w interakcję z odległością. Wynik sugeruje, że w zastosowanej konfiguracji czynnik akustyczny (poziom/odległość) dominował nad czynnikiem wizualnym. W Etapie III krótkotrwała ekspozycja na *HTW*, *HD* lub ciszę nie spowodowała istotnych zmian w wynikach testów neurokognitywnych. Wyniki testów były spójne z niskimi ocenami dokuczliwości wg skali IC BEN, co wspiera hipotezę H3, że precyzyjna ocena dokuczliwości jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych.

Do wkładu metodycznego należą: (1) sposób konstruowania bodźców *HTW/HD* oparty na funkcjach przejścia (umożliwia kontrolę widma i poziomu przez parametr odległości), (2) implementacja i raportowanie progów dyskryminacji dokuczliwości w SNR, (3) integracja pomiarów EEG i testów kognitywnych z oceną dokuczliwości w kontrolowanych warunkach. Praca kończy się rekomendacjami dla dalszych badań (dłuższa ekspozycja, zaangażowanie do badań mieszkańców sąsiedztwa farm, większa zmienność warunków meteorologicznych, wyraźniejsze manipulacje wizualne).

Summary

The dissertation addresses the issue of annoyance caused by wind turbine noise (*HTW*) and methods for its reduction using so-called “soft reduction methods” (*MMR*). The objective of *MMR* is to change the perception of noise and improve annoyance ratings without necessarily lowering the *HTW* level at the receiver (immission point). Three research hypotheses were defined and tested: (H1) *HTW* can be masked by road traffic noise (*HD*) and by road traffic noise with a wind component (*HD+W*); (H2) the annoyance of *HTW* can be reduced by occluding the visual view of the wind turbine; (H3) accurate assessment of annoyance is feasible under controlled conditions after eliminating non-acoustic factors.

The research was divided into three stages aligned with these hypotheses. The experiments used acoustic stimuli prepared with transfer functions (based on the Nord2000 methodology), enabling distance parameterization and consistent propagation modelling. Audiovisual presentations were delivered in a VR environment. To minimize the influence of non-acoustic factors, methods based on neurocognitive indicators were used: EEG, the SART test, MaRs-IB matrices, and the DASS questionnaire.

In Stage I, annoyance discrimination thresholds for *HTW* against *HD/HD+W* were determined. Mean SNR values at which participants no longer differentiated the annoyance of *HTW* were negative (approx. –15 to –8 dB), indicating limited masking effectiveness; the presence of a wind component in the masker did not materially affect the results. Annoyance ratings on the IC BEN scale did not depend significantly on the masker level or the presence of wind. In Stage II (VR), the effects of occluding the turbine with trees and turbine–listener distance (as a proxy for level) on annoyance were examined. Distance showed a significant effect (annoyance ratings decreased as the source level decreased), whereas the degree of turbine occlusion was not significant and did not interact with distance. This suggests that in the applied configuration the acoustic determinant (level/distance) dominated over the visual layer. In Stage III, short-term exposure to *HTW*, *HD*, or silence did not produce significant changes in neurocognitive test outcomes. The test results were consistent with low IC BEN annoyance ratings, which supports H3 that precise annoyance assessment is possible after eliminating non-acoustic factors.

The methodological contributions include: (1) a transfer-function-based procedure for constructing *HTW/HD* stimuli (allowing control over spectrum and level via the distance parameter), (2) implementation and reporting of annoyance discrimination thresholds in SNR units, and (3) integration of EEG measurements and cognitive tests with annoyance assessment under controlled conditions. The dissertation ends with recommendations for further research (longer exposures, involvement of residents living near wind farms, greater variability of meteorological conditions, stronger visual manipulations).

Streszczenie w języku niespecjalistycznym

Rozprawa dotyczy dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych i sposobów jej ograniczania za pomocą tzw. „miękkich metod redukcji” czyli rozwiązań, które mają poprawiać odbiór dźwięku bez konieczności realnego obniżania jego poziomu. Sformułowano trzy pytania badawcze: (1) czy hałas drogowy może zamaskować dźwięk turbiny, (2) czy zastanianie turbiny drzewami zmniejsza dokuczliwość, oraz (3) czy da się rzetelnie oceniać dokuczliwość w warunkach kontrolowanych, gdy ograniczymy wpływ osobistych uprzedzeń i doświadczeń u badanych.

Badania podzielono na trzy etapy. W każdym wykorzystano specjalnie przygotowane nagrania hałasu turbin wiatrowych, które zmieniały się wraz ze zmianą odległości, dla której prezentowano źródło. Do badań wykorzystano także hałas drogowy i hałas wiatru. W jednym z etapów wykorzystano środowisko wirtualnej rzeczywistości (VR) do prezentacji audiowizualnych scen. W ostatnim etapie badań, w celu ograniczenia wpływu czynników pozaakustycznych zastosowano pomiar aktywności mózgu i proste testy uwagi oraz rozumowania.

Etap I polegał na maskowaniu hałasu turbiny wiatrowej innym dźwiękiem - hałasem drogowym lub hałasem drogowym wraz z hałasem wiatru. Celem był sprawdzenie, czy w obecność innego dźwięku sprawi, że badani nie będą w stanie rozpoznać hałasu turbiny wiatrowej. Założono, że jeżeli nie da się usłyszeć źródła hałasu to nie może być ono dokuczliwe. Uzyskane wyniki wskazały, że dla uzyskania efektu maskowania poziom hałasu drogowego musiał znacząco przewyższać poziom hałasu turbiny wiatrowej. Hałas wiatru nie wpływał na spostrzeżenie hałasu turbiny i dokuczliwość hałasu. Dodatkowo oceny dokuczliwości nie malały znacząco wraz ze zwiększaniem się poziomu hałasu autostrady. W Etapie II w środowisku VR porównano sceny z turbiną różnych odległościach, całkowicie widoczną lub częściowo zastoniętą drzewami. Wbrew oczekiwaniom okazało się, że położenie turbiny wiatrowej (i powiązany z nim poziom dźwięku) był głównym czynnikiem wpływającym na oceny dokuczliwości. Zastanianie turbiny wiatrowej nie było znaczące w ocenie hałasu. W Etapie III sprawdzono jak przebywanie w hałasie turbiny wiatrowej, hałasie drogowym lub w ciszy wpłynie na uwagę, szybkość wykonywania zadań umysłowych i nastroj. Wykorzystano do tego pomiar EEG i specjalne testy poznawcze. Badani nie wiedzieli jakich dźwięków słuchają. Nie stwierdzono istotnych różnic między ekspozycją na dźwięki turbiny, hałas drogi i ciszę. Jednocześnie wartości dokuczliwości oceniane po badaniu były na bardzo niskim poziomie, co pokazuje, że po wykluczeniu nastawienia badanych do źródła hałasu dokładna ocena dokuczliwości jest możliwa.

Wśród wniosków stwierdzono, że maskowanie hałasu turbin wiatrowych innymi dźwiękami jest bardzo skomplikowane i trudne do zastosowania. W pracy przedstawiono nowy, ciekawy sposób na przygotowanie próbek do badań poprzez filtrowanie dźwięków oryginalnych przez specjalnie obliczone filtry. Taki zabieg pozwala zasymulować dźwięk pochodzący od źródła w dowolnej odległości. Ostatnie spostrzeżenie dotyczy wykorzystania testów i badań psychologicznych jako obiecującej metody do oceny percepcji hałasu.

Spis skrótów i pojęć

$\%HA$	procent osób badanych deklarujących skrajną dokuczliwość hałasu
<i>airfoil</i>	profil lotniczy / przekrój łopaty turbiny wiatrowej
<i>AM</i>	z ang. <i>amplitude modulation</i> – modulacja amplitudowa; w przypadku <i>HTW</i> : hałas o okresowo zmiennej amplitudzie
<i>angle of attack, α</i>	kąt natarcia łopaty turbiny wiatrowej
C_L	lift coefficient - współczynnik siły nośnej
C_{PR} / C_P	z ang. <i>power coefficient</i> - współczynnik sprawności turbiny wiatrowej
<i>cut-off speed</i>	granicznej prędkości obrotów śmigła
<i>DASS</i>	Depression Anxiety Stress Scale - kwestionariusz samooceny depresji, leku i stresu
<i>dose-response</i>	funkcja reakcji badanych (np. deklarowanej dokuczliwości) na zmianę ekspozycji hałasu
<i>EEG</i>	elektroencefalograf
<i>HAWT</i>	<i>horizontal axis wind turbine</i> – turbina wiatrowa o horyzontalnej osi obrotu śmigła
<i>HD</i>	hałas drogowy
<i>HD+W</i>	hałas drogowy i hałas wiatru
<i>HTW</i>	hałas turbin wiatrowych
L_{AeqD}	równoważny poziom hałasu dla pory dnia
L_{AeqN}	równoważny poziom hałasu dla pory nocy
L_{DEN}	długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku, z uwzględnieniem pory dnia, wieczoru i nocy
<i>leading edge</i>	krawędź wiodąca łopaty
<i>lift, L</i>	z ang. siła nośna
L_N	długookresowy średni poziom dźwięku wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku
L_W	moc akustyczna turbiny wiatrowej
L_{Wmax}	moc akustyczna turbiny wiatrowej dla granicznej prędkości obrotów śmigła (ang. <i>cut-off speed</i>)
<i>m.n.p.t.</i>	skrót: <i>metry nad poziomem terenu</i>
<i>MaRs-IB</i>	Matrix Reasoning Item Bank – test rozpoznawania wzorców i dedukcji logicznej
<i>MMR</i>	„miękkie” metody redukcji (hałasu) – metody poprawiające subiektywny odbiór

<i>Offshore</i>	ang. poza wybrzeżem – określenie typu turbin wiatrowych lokalizowanych na otwartym morzu
<i>Onshore</i>	ang. na wybrzeżu – określenie typu turbin wiatrowych lokalizowanych na stałym gruncie
<i>OZE</i>	Odnawialne Źródła Energii – za OZE uznaje się energię słoneczną, energię wiatrową, energię wodną, energię geotermalną oraz biomasę.
<i>POŚ</i>	Prawo Ochrony Środowiska, wł. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska
refrakcja	zmiana kierunku rozchodzenia się fali dźwiękowej na granicy ośrodków o różnej gęstości lub temperaturze
<i>roughness length</i>	szorstkość terenu, współczynnik oporności przepływu wiatru
ruminacje	natrętne, negatywne myśli
<i>SART</i>	<i>Sustained Attention to Response Task</i> - zadania sprawdzające zdolność utrzymania uwagi
<i>shadow flicker</i>	efekt migotania cienia
<i>soundscape</i>	pejzaż akustyczny
<i>TBR</i>	Theta/Beta Ratio - współczynniki aktywności w mózgu fal theta oraz beta
<i>tip</i>	końcówka łopaty
<i>TMR</i>	„twarde” metody redukcji (hałasu)
<i>trailing edge</i>	krawędź sptywu łopaty
<i>TW</i>	turbina wiatrowa
<i>VAWT</i>	<i>vertical axis wind turbine</i> – turbina wiatrowa o wertykalnej osi obrotu śmigła
<i>VR</i>	ang. <i>virtual reality</i> – rzeczywistość wirtualna
<i>WHO</i>	World Health Organization
<i>wind shear</i>	gradient prędkości wiatru
<i>yaw angle, β</i>	kąt osi obrotu śmigła względem kierunku wiatru

Dorobek naukowy

Wykaz artykułów stanowiących dorobek przedstawiony w postępowaniu

Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 13 ust. 2 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, w rozprawie doktorskiej pt. „*Metody redukcji hałasu turbin wiatrowych ze szczególnym uwzględnieniem metod ‘miękkich’*”.

Oświadczenia współautorów dotyczące wkładu w przygotowanie każdej publikacji stanowią załączniki do niniejszej rozprawy.

- Rościszewska, A., Buszkiewicz, M.J., Dobrzynska-Kobylec, G., i in. 2025. Cognitive neuroscience approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions. *Humanities & Social Sciences Communications* 12, 1–18.
- Buszkiewicz, M.J., Wicher, A.J., i Pyffel, R. 2023. Method for determining the threshold of wind turbine noise masking by highway noise as function of distance. *Proceedings of Forum Acusticum 2023: 10th Convention of EAA*, European Acoustics Association, 3091–3095.

Pozostałe publikacje naukowe

- Makarewicz, R. i Buszkiewicz, M.J. 2023. Corrected Long-Term Time-Average Sound Level of Amplitude-Modulated Wind Turbine Noise. *Archives of Acoustics* 48, 281–285.
- Błasiński, Ł., Pastusiak, A., Buszkiewicz, M.J., i Kociński, J. 2022. Objective and subjective assessment of the speech intelligibility in rooms with an Active Acoustic Enhancement Systems. *Proceedings Internoise 2022*, Institute of Noise Control Engineering of the USA, 1–10.

Udział w konferencjach – wystąpienia ustne

- **LII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki**, Szczyrk, Polska, 26.02-01.03.2024 r. Udział czynników wzrokowych w ocenie dokuczliwości hałasu turbiny wiatrowej, Buszkiewicz M., Wicher A., Pastusiak A.
- **2nd Conference on Sound Perception**, Poznań, Polska, 01-03.09.2023 r., Preliminary study of wind turbine visual annoyance reduction with source masking in virtual reality, Buszkiewicz M., Pastusiak A.
- **Forum Acusticum 2023 & 10th Convention of the European Acoustics Association**, Turyn, Włochy, 11-15.09.2023 r., Method for determining the threshold of wind turbine noise masking by highway noise as function of distance, Buszkiewicz M., Wicher A., Pyffel R.
- **LXVIII Open Seminar on Acoustics**, Solina, Polska, 12-16.09.2022 r., Road traffic noise influence on wind turbine noise detection, Buszkiewicz M., Wicher A., Gotębiewski R., Pyffel R.

- **XVII Konferencja z cyklu: Akustyka w Audiologii i Foniatrii**, Poznań, Polska, 03-04.06.2022 r., Zastosowanie środowiska VR w badaniach psychoakustycznych nad dokuczliwością hałasu, Buszkiewicz M., Kryszak M.

Udział w konferencjach - prezentacje posterowe

- **13th ICBen Congress on Noise as a Public Health Problem, 9. Special topics related to noise effects**, Sztokholm, Szwecja, 14-17.06.2021 r., Toys' noise measurement - do we need alternative approach?, Buszkiewicz M., Pastusiak A.

Projekty badawcze

- **Wykonawca:** Healthy society-towards optimal management of wind turbines' noise – Work Package 5, Reduction of wind turbines noise.
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR)
Program: „Badania stosowane” w ramach Norweskiego Mechanizmu Finansowego 2014-2021 / POLNOR 2019

I Wstęp

1. Wprowadzenie

W listopadzie 2019 roku Parlament Europejski ogłosił plan działań dla Europy stanowiący odpowiedź na trwający kryzys klimatyczny. Nazwano go Zielonym Ładem [1]. Zgodnie z jego założeniami gospodarki krajów Unii Europejskiej do 2050 roku miałyby stać się neutralne klimatycznie, a więc bilans emisji gazów cieplarnianych byłby równy zero. Jako środki na przeprowadzenie tej transformacji wskazano następujące działania:

- inwestycje w rozwiązania produkcji prądu z czystych lub odnawialnych źródeł energii (OZE), takich jak wodór, energia słoneczna lub wiatr;
- działania na rzecz zrównoważonego transportu poprzez rozwój elektromobilności i transportu kolejowego;
- zmiana produkcji i konsumpcji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym – wytwarzanie towarów trwalszych, podatnych do naprawy lub recyklingu, a tym samym zmniejszenie ilości odpadów;
- rozwój rolnictwa ekologicznego poprzez zmniejszenie ilości wykorzystywanych pestycydów i nawozów chemicznych;
- termomodernizacja budynków mieszkalnych i budynków użyteczności publicznej.

Podobne ustalenia dotyczące walki ze zmianami klimatycznymi przeprowadzono w ubiegłych latach, m.in. w 1997 roku (Protokół z Kioto) oraz w 2015 roku (Porozumienie Paryskie). Każdy z uchwalonych traktatów koncentrował się na redukcji emisji gazów cieplarnianych i spowolnienia wzrostu średniej globalnej temperatury. Podejmowane działania stanowią odpowiedź na pogarszający się stan klimatu na Ziemi, którego skutkiem jest wzrost średniej globalnej temperatury, wynosząc obecnie (okres oceny: 2011-2020 r.) 1,09°C powyżej wartości z czasów sprzed rewolucji przemysłowej (okres oceny: 1850-1900 r.) [2]. Analizy IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) wskazują, że sama działalność człowieka odpowiada za wzrost równy 1,07°C. W ostatnich latach trend zmian średniej globalnej temperatury stale rośnie co oznacza, że zmiany klimatyczne i ich negatywne skutki mogą następować coraz szybciej [2]. Działaniem, w którym wielu dopatruje się rozwiązania obecnych problemów z klimatem jest rozwój technologii OZE. Energia produkowana w ten sposób jest bardziej ekologiczna i tańsza, niż prąd z elektrowni węglowych. Najczęściej spotykanymi instalacjami służącymi do produkcji prądu elektrycznego z OZE są panele słoneczne oraz turbiny wiatrowe (TW). Spośród nich największe kontrowersje wywołują TW jako obiekty potencjalnie degradujące krajobraz i generujące hałas.

W Polsce rozwój energetyki wiatrowej rozpoczął się na początku lat 90. XX wieku. Upowszechnienie tego sektora gospodarki nastąpiło po 2005 roku, w wyniku wejścia w życie przepisów wspierających odnawialne źródła energii, tzw. certyfikaty zielonej energii, które

umożliwiały obrót świadectwami pochodzenia energii z OZE [3]. Ten mechanizm sprawił, że inwestycje w farmy wiatrowe stały się bardzo opłacalne i wpłynęły na dynamiczny wzrost liczby *TW*, a moc zainstalowanych elektrowni wiatrowych w Polsce rosta w tempie kilkuset megawatów rocznie. Ze względu na brak odpowiednich przepisów regulujących nowe inwestycje w sektorze energetyki wiatrowej powstawały bardzo szybko, bez przeprowadzania odpowiednich konsultacji społecznych i przy braku poszanowania środowiska naturalnego oraz krajobrazu. To wywołało społeczne niezadowolenie i zapoczątkowało dyskusję na temat hałasu i potencjalnych zagrożeń związanych z *TW*. W rezultacie doprowadziło to do wprowadzenia regulacji dotyczących minimalnej odległości farm wiatrowych od zabudowań, tzw. „ustawy 10H” [4]. Zapis art. 4, ust. 1 określał minimalną odległość między zabudową mieszkalną a najbliższą *TW* jako „dziesięciokrotność wysokości elektrowni wiatrowej mierzonej od poziomu gruntu do najwyższego punktu budowli, wliczając elementy techniczne, w szczególności wirnik wraz z łopatami (całkowita wysokość elektrowni wiatrowej)” [4]. W wielu przypadkach strefa wykluczenia dla *TW* wokół gospodarstw domowych miała promień wynoszący 1,5 km do 2 km. Zapis „ustawy 10 H” istotnie wpłynął na spowolnienie (wg niektórych wręcz zatrzymanie) nowych inwestycji w sektorze energetyki wiatrowej. Stało to w sprzeczności do przyjętego później Europejskiego „Zielonego Ładu”, zaś sama metoda wyznaczania odległości między turbinami a zabudową – wyłącznie w oparciu o wysokość elektrowni – nie miała merytorycznego uzasadnienia, przyjęto ją w sposób arbitralny.

W 2023 roku uchwalono ustawę liberalizującą prawo dotyczące nowych inwestycji w zakresie elektrowni wiatrowych [5]. Zmiana pozwala na lokalizację nowych farm wiatrowych w odległości nie mniejszej niż 700 m od budynków mieszkalnych. W zakres ustawy wpisano również konieczność przeprowadzania konsultacji społecznych i kampanii edukacyjnych wśród mieszkańców okolicznych terenów. Zmiany skutecznie odblokowały możliwość realizacji inwestycji w zakresie OZE i tym samym wypełnienia postanowień „Zielonego Ładu”. Niestety, podobnie jak przy pierwszej ustawie regulującej lokalizację *TW*, minimalna odległość od zabudowy mieszkaniowej nie ma merytorycznego uzasadnienia. Kolejne zapowiadane zmiany w prawie utrzymują tendencję redukcji odległości między *TW* a zabudową¹ zamiast wyznaczania strefy wykluczenia wokół elektrowni m.in. w oparciu o ich obliczony zasięg oddziaływania akustycznego – tak jak sugerują naukowcy [6].

Temat turbin wiatrowych budzi kontrowersje na całym świecie. Powody tych kontrowersji mogą być obiektywne, związane z hałasem i degradacją krajobrazu. Wiele czynników wpływających na negatywne postrzeganie technologii wiatrowej ma jednak podłoże subiektywne. Należą do nich powielane stereotypy i brak edukacji, poglądy polityczne lub konflikty na linii mieszkańcy – Zarządzający farmami wiatrowymi. Podjęta tematyka pracy związana jest z opisanym procesem transformacji energetycznej w Europie. W wyniku inwestycji w OZE i wraz ze zwiększaniem się liczby nowych *TW*, rośnie liczba osób narażonych na hałas turbin wiatrowych (*HTW*). W obecnej sytuacji prawnej *HTW* rzadko przekracza dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku [7], zarówno w ujęciu dobowym jak i średniorocznym. Turbiny wiatrowe są jednak uznawane za

¹ Obecnie dyskutowana jest zmiana odległości na wynoszącą 500 m.

źródło bardziej dokuczliwe od pozostałych źródeł hałasu [8], takich jak samochody lub kolej. Dokuczliwość wywołana *HTW* negatywnie oddziałuje na zdrowie i dobrostan ludzi. Potwierdza negatywne stereotypy i pogłębia niezadowolenie związane z technologią wiatrową.

2. Cele i zakres pracy

Niniejszą dysertację poświęcono opracowaniu, przygotowaniu i określeniu skuteczności „miękkich” metod redukcji (*MMR*) czyli rozwiązań zmniejszających dokuczliwość wywołaną *HTW*. Celem ich stosowania jest poprawa subiektywnego odbioru *HTW* bez koniecznej redukcji poziomu hałasu w punkcie emisji. Zadaniem *MMR* jest zmniejszenie stopnia percepcji *HTW* i poprawa oceny dokuczliwości ich hałasu. Powszechnie stosowane metody redukcji hałasu² związane są ze zmniejszaniem poziomu mocy akustycznej źródła lub ograniczeniem poziomu hałasu w punkcie emisji. Na potrzeby prowadzonych w tej pracy rozważań nazwano je „twardymi” metodami redukcji (*TTW*). Stosuje się je w celu zapewnienia akustycznych standardów środowiskowych.

MMR opracowano w oparciu o dogłębny przegląd literatury naukowej, konsultacje ze środowiskiem naukowym i branżowym. Metody redukcji dokuczliwości hałasu wykorzystują mechanizm maskowania innymi dźwiękami i zmniejszenie jego percepcji [9], [10], [11], [12]. W zakresie *HTW* literatura nie obfituje w opisy badań nad *MMR* w przeciwieństwie do prac nad *TMR*. Nie znaleziono również przykładów praktycznego wykorzystania do redukcji *HTW* rozwiązań, które wpisywałyby się w definicję *MMR*. Argumentem za rzadkim wykorzystaniem *MMR* jest trudność w jednoznacznym określeniu skuteczności oraz złożoność implementacji w rzeczywistych warunkach. Niska skuteczność jest także podyktowana wpływem pozaakustycznych czynników wpływających na dokuczliwość *HTW* [13]. Do takich czynników należą m.in. przyjęte stereotypy, negatywne nastawienie do technologii wiatrowej i Zarządzających farmą oraz widoczność turbiny wiatrowej.

Głównym celem badawczym było **zapropozowanie rozwiązań służących redukcji dokuczliwości wywołanej hałasem turbin wiatrowych.**

Dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych jest związana z rozpraszaniem lub przeszkadzaniem w wykonywaniu codziennych czynności (patrz: Rodz. 7.1.1). Na dokuczliwość *HTW* mają wpływ również czynniki pozaakustyczne. W związku z tym, opracowując eksperymenty sprawdzające skuteczność *MMR*, skoncentrowano się na tych dwóch aspektach:

- redukcji detekcji hałasu turbin wiatrowych (związanej z rozpraszaniem),
- redukcji wpływu czynnika wizualnego na dokuczliwość.

W celu podniesienia progu spostrzegania (detekcji) dźwięków stosuje się maskowanie (patrz: rozdział 9.3.1), polegające na prezentowaniu sygnału, którego próg detekcji chcemy podnieść, wraz z bodźcami maskującymi. Bodźce maskujące powinny być oceniane neutralnie albo

² np. ekrany akustyczne, wibroizolatory, tłumiki, regulacja czasu pracy i mocy urządzeń itp.

pozytywnie, by po ich zastosowaniu ocena dokuczliwości całego bodźca nie uległa pogorszeniu. Podobne podejście można przyjąć chcąc zredukować widoczność danego obiektu – zastonić (zamaskować go) innym obiektem, którego wizerunek jest odbierany pozytywnie albo przynajmniej neutralnie. Wpływa to na ograniczenie rozpoznawania źródła hałasu.

W oparciu o te informacje określono dwa cele szczegółowe:

- 1. Określenie warunków maskowania hałasu turbin wiatrowych, dla których zmieniają się progi detekcji tego hałasu.**
- 2. Określenie warunków zastonięcia turbiny wiatrowej w jakich ocena dokuczliwości hałasu ulega zmniejszeniu.**

Koniecznym aspektem badań było określenie rzeczywistej dokuczliwości *HTW* przy wykluczeniu czynników pozaakustycznych. Chodziło o stwierdzenie na ile hałas turbin wiatrowych jest dokuczliwy w porównaniu z innymi źródłami hałasu środowiskowego, jeżeli z analizy wykluczy się postawy jakie badani mają w stosunku do energetyki wiatrowej. Trzeci cel szczegółowy sformułowano następująco:

- 3. Określenie dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych z wyłączeniem wpływu czynników pozaakustycznych.**

W oparciu o opisane cele określono hipotezy badawcze i eksperymenty, które miały je zweryfikować. Hipotezy badawcze opisano w sekcji III. Sformułowano je na podstawie przeglądu literatury opisanego w sekcji II, dlatego jako naturalna kontynuacja rozprawy umieszczono je w kolejnej części.

3. Opis struktury pracy

Rozprawa składa się z dwóch zasadniczych części: (1) teoretycznej, która przedstawia podstawowe zagadnienia i problematykę badawczą, oraz (2) eksperymentalnej, w której opisano przeprowadzone eksperymenty, ich wyniki, interpretację oraz wnioski. Struktura pracy odzwierciedla kolejność stawianych pytań, formułowania hipotez i ich empirycznej weryfikacji.

Przegląd literatury i obecny stan wiedzy (sekcja II) prezentuje wiedzę wykorzystaną podczas prowadzonych badań. Autor miał na celu przedstawić szeroki kontekst problematyki dokuczliwości wywołanej przez *HTW*. Przegląd rozpoczyna się od rozwoju energetyki wiatrowej, przez opis *TW* jako źródła hałasu wraz z mechanizmami generacji i propagacji dźwięku. W kolejnych rozdziałach omówiono obowiązujące wskaźniki i regulacje prawne, zarysowano skutki zdrowotne ekspozycji na *HTW* ze szczególnym uwzględnieniem dokuczliwości, oraz wymieniono metody oceny hałasu turbin. Zakończeniem sekcji jest przegląd metod redukcji hałasu turbin wiatrowych obejmujący zarówno metody „twarde” jak i metody „miękkie”. Ta sekcja stanowi bazę wiedzy wykorzystaną do sformułowania celów i hipotez badawczych oraz zaprojektowania eksperymentów.

W sekcji III zdefiniowano trzy hipotezy badawcze (H1–H3), wynikające bezpośrednio z przeglądu literatury i odnoszące się odpowiednio do: maskowania hałasu turbin przez inne źródła dźwięków, wpływu czynnika wizualnego na ocenę dokuczliwości oraz możliwości obiektywnej oceny dokuczliwości za pomocą wskaźników neurokognitywnych. Każdą z hipotez przyporządkowano do odrębnego etapu eksperymentalnego.

Metodyka badań i aparatura (sekcja IV) opisuje metodykę i aparaturę wykorzystaną w przeprowadzonych eksperymentach. W sekcji opisano charakterystykę pomiarów i nagrań terenowych oraz sposób przygotowania bodźców akustycznych w oparciu o obliczone funkcje przejścia. Przedstawiono konfiguracje prezentacji bodźców (w tym środowisko VR), aparaturę pomiarowo-odsluchową, kryteria doboru uczestników oraz procedury eksperymentów i gromadzenia wyników.

Sekcja V prezentuje wyniki kolejnych etapów, spójnych z hipotezami. Etap I (dwa eksperymenty) był związany z maskowaniem *HTW* przez hałas drogowy (*HD*) lub przez hałas drogowy ze składową wiatru (*HD+W*). W etapie II przeprowadzono eksperyment w środowisku VR, który badał wpływ zmiany odległości i zastąpienia turbiny drzewami na ocenę dokuczliwości. Etap III oceniał krótkotrwały wpływ ekspozycji *HTW* lub *HD* na dynamikę neuronalną, uwagę i rozumowanie oraz stan emocjonalny. Każdy podrozdział zawiera wyniki w formie tabelarycznej i w postaci wykresów oraz opis analizy statystycznej.

Dyskusję wyników, stanowiącą sekcję VI, przeprowadzono analizując wyniki każdego etapu badań i konfrontując je z literaturą oraz postawionymi celami pracy. W sekcji sformułowano wstępne wnioski i wskazano na ograniczenia zastosowanych metod. Na tej bazie w sekcji VII przeprowadzono osobno weryfikację każdej z przyjętych hipotez badawczych i sformułowano wnioski końcowe. W sekcji VIII podsumowano uzyskane rezultaty ze wskazaniem kierunku dla dalszych badań.

Rozprawę zamyka sekcja IX Bibliografia, obejmująca wszystkie źródła cytowane w pracy. Uzpełnieniem pracy są 2 załączniki obejmujące dwie publikacje naukowe związane z rozprawą, które należą do dorobku autora. Prace dokumentują część wyników w obiegu recenzenckim i stanowią materiał odniesienia dla zainteresowanych replikacją procedur.

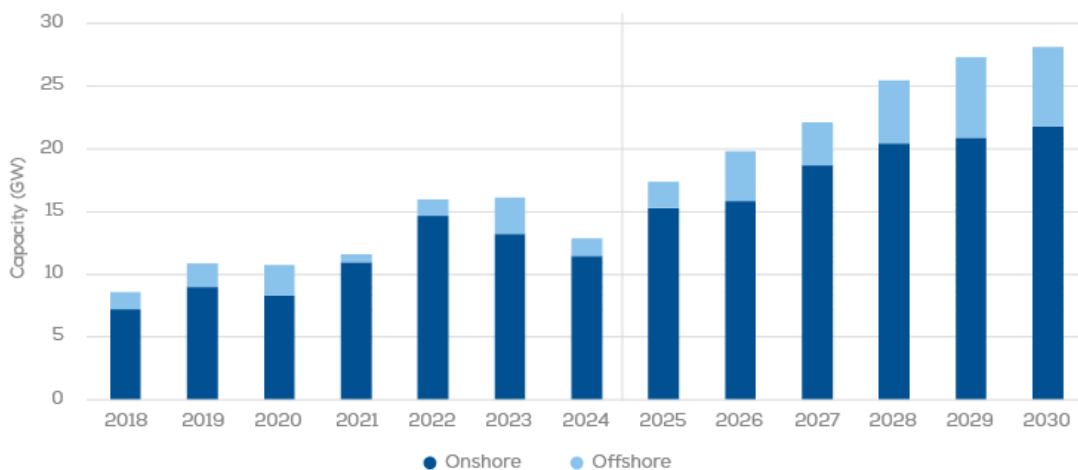
II Przegląd literatury i obecny stan wiedzy

4. Energetyka wiatrowa

Energetyka wiatrowa to prężnie rozwijającą się branża, która wraz z pozostałymi OZE, uważana jest za rozwiązanie problemu globalnego ocieplenia. W 2028 roku moc instalacji wiatrowych w Europie ma przekroczyć 20 GW [14]. Po 2023 roku, wraz z liberalizacją prawa w zakresie elektrowni wiatrowych [5], całkowita moc zainstalowana w lądowej energetyce wiatrowej wyniosła 9.43 GW, co stanowiło ponad 14% mocy całego krajowego systemu elektroenergetycznego [15].

W Europie w 2024 roku 19% wykorzystanej energii pochodziło z energetyki wiatrowej. Prym w zakresie produkcji energii z wiatru wiodą Dania, Irlandia, Szwecja i Niemcy [14]. W roku 2024 łączna moc zainstalowanych turbin wiatrowych (zarówno lądowych jak i morskich) wynosiła 16,4 GW, przy czym aż 84% nowo wygenerowanej mocy pochodziła z turbin lądowych. Wykres na Rys. 4-1 przedstawia całkowitą moc instalacji wiatrowych w latach 2018-2024 oraz prognozę rozwoju branży wiatrowej w latach 2025-2030 [14].

FIGURE B. 2025-30 annual onshore and offshore wind power installations in the EU - WindEurope's Outlook



Rys. 4-1 Całkowita moc instalacji wiatrowych w latach 2018-2024 oraz prognoza na lata 2025-2030. Granatowe słupki („Onshore”) oznaczają instalacje lądowe, błękitne słupki („Offshore”) dotyczą instalacji morskich.

Zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii jest duże nie tylko wśród podmiotów komercyjnych, ale także w sektorze konsumenckim. Rządowe dofinansowania do przydomowej energetyki wiatrowej [16], czy konkursy mające propagować energię odnawialną z wiatru [17] służą edukacji i wzmacniają świadomość Polaków w tym zakresie.

Przedstawiona charakterystyka sugeruje, że sektor energetyki wiatrowej w najbliższych latach w Polsce będzie się stale rozwijał. Oznacza to prawdopodobne zwiększenie liczby osób narażonych na ponadnormatywne poziomy *HTW* i ryzyko wystąpienia wśród nich dokuczliwości

i innych negatywnych skutków zdrowotnych. Z tego powodu podjęta tematyka pracy jest zasadna.

4.1. Turbina wiatrowa

Turbina wiatrowa (*TW*) jest urządzeniem służącym do zamiany energii kinetycznej z wiatru na energię elektryczną za pomocą wprowadzanej w ruch prądnicy. *TW* wywodzą się z wiatraków służących do mielenia zbóż, których pierwsze przypadki użycia można zaobserwować w Europie już w XII wieku [18]. Rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje elektrowni wiatrowych, których podział bazuje na orientacji osi obrotu śmigła:

- turbiny o horyzontalnej osi śmigła (ang. *horizontal axis wind turbine* – HAWT)
- turbiny o pionowej (wertykalnym) osi śmigła, tzw. rotorowe (ang. *vertical axis wind turbine* – VAWT).

Przykłady obu rodzajów turbin przedstawia Rys. 4-2.



a)



b)

Rys. 4-2 Przykład turbin wiatrowych: a) *TW* o horyzontalnej osi obrotu śmigła; b) *TW* o pionowej osi obrotu śmigła.

Turbiny o horyzontalnej osi śmigła (HAWT) są stosowane w około 90% rozwiązań, szczególnie wykorzystuje się je w wielkoskalowej produkcji przemysłowej, czyli na farmach wiatrowych. Takie przedsięwzięcia zazwyczaj obejmują od kilku do kilkudziesięciu *TW* zlokalizowanych na otwartej przestrzeni. Turbiny typu HAWT często są znacznych rozmiarów – najczęściej spotykane w Polsce *TW* (o mocy ok. 2 MW) mają wieżę wyniesioną do wysokości około 100 m.n.p.t., a promień śmigła wynosi około połowy tej długości. W rezultacie maksymalny punkt wysokości przeciętnej *TW* na terenie Polski wynosi około 150 m.

Turbiny o pionowej osi śmigła (VAWT) spotyka się głównie w instalacjach przydomowych, o małej mocy. Instaluje się je w miejscach o ograniczonych prędkościach wiatru, np. na dachach budynków lub blisko powierzchni ziemi. Ze względu na niską prędkość obrotową śmigła nie produkują znacznych ilości energii elektrycznej, dlatego są stosowane jako doraźne źródła zasilania. Popularnym typem turbiny VAWT jest turbina Savoniusa (przedstawiona na Rys. 4-2b). Turbiny VAWT nie są omawiane w niniejszej rozprawie.

Bardzo ważnym typem turbiny o horyzontalnej osi śmigła są tzw. turbiny typu „*offshore*” czyli elektrownie przystosowane do instalacji na otwartym morzu. Częstotliwość występowania korzystnych warunków wietrznych na morzu wynosi niemal 100%, a jego prędkość jest również dużo większa ze względu na brak przeszkód terenowych i występowanie zmiennych prądów morskich. Turbiny, w zależności od warunków technicznych, mogą być przytwierdzone do dna morza lub unosić się na pływających platformach. Turbiny typu *offshore* z punktu widzenia ochrony przed hałasem bada się pod względem wpływu na środowisko naturalne (morską faunę i ptactwo). Lokalizacja farm wiatrowych *offshore* daleko od stałego lądu, sprawia, że emitowany przez nie hałas nie stanowi zagrożenia dla dobrostanu ludzi i standardów środowiskowych. Wadami elektrowni wiatrowych na morzu są wysokie koszty eksploatacji farm, szybsze zużywanie się elektrowni i konieczność budowy dodatkowej infrastruktury energetycznej takiej jak linie elektroenergetyczne czy GPZ (Główny Punkt Zasilający) na brzegu morza. Niniejsza rozprawa dotyczy wyłącznie turbin znajdujących się na lądzie nie obejmuje swoim zakresem hałasu generowanego przez turbiny typu *offshore*.

Ostatnia klasyfikacja *TW* polega na ustawieniu śmigła względem kierunku wiatru: od strony nawietrznej (*upwind*) albo zawietrznej (*downwind*). Obecnie w przeważającej liczbie instalacji wykorzystuje się turbiny ze śmigłem od strony nawietrznej, których zaletą jest m.in. to, że wiatr przed poruszeniem śmigła nie wytraca energii mijając wieżę.

W dalszych rozważaniach skupiono się na lądowych *TW* o horyzontalnej osi obrotu śmigła (*HAWT*) ze śmigłem po stronie nawietrznej (*upwind*). Konstrukcja takiej *TW* składa się z trzech podstawowych elementów:

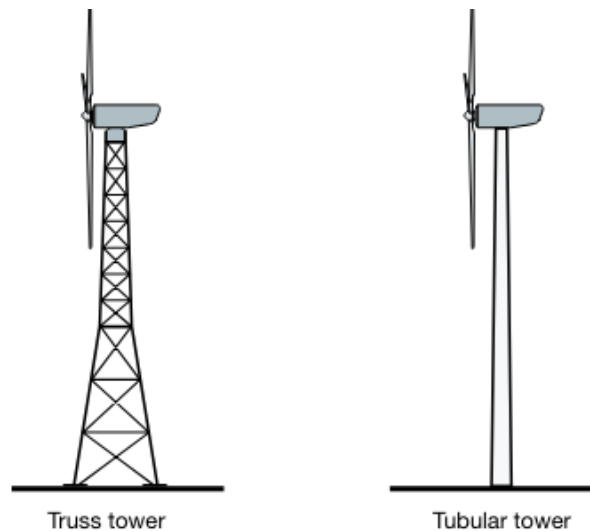
- wieża,
- gondola,
- śmigło z łopatami.

4.1.1. Wieża

Wieża to podstawowy element turbiny wiatrowej. Wieża *TW* musi być wysoka i wytrzymała. Wysokość wieży jest dostosowywana do warunków panujących na farmie wiatrowej i wpływa na ilość generowanej energii elektrycznej. Im wyższa wieża, tym większa ilość energii, którą *TW* może wyprodukować, ponieważ z reguły prędkość i objętość mas powietrza zwiększa się wraz z wysokością n.p.t. [19]. Wysokość wieży wpływa również na stabilność i wytrzymałość konstrukcji. Wysokość przeciętnej wieży *TW* typu *onshore* wynosi około 100 m. Wieże turbin lokalizowanych na lądzie mają większą wysokość niż wieże turbin *offshore*. Wynika to z faktu, że blisko podłoża istnieje więcej przeszkód terenowych, które wywołują bardziej turbulenty przepływ powietrza – niekorzystny dla produkcji prądu [20]. Wiatr w wyższych partiach jest bardziej stabilny i ma większą prędkość. Te problemy nie dotyczą turbin typu *offshore*, które mogą być tak samo wydajne przy zastosowaniu niższej wieży.

Wytrzymałość wieży zależy od materiału, z którego jest wykonana, a także od typu konstrukcji. Najczęściej wieże turbin wykonuje się ze stalowych kratownic albo betonowych lub stalowych

segmentów-pierścieni. Te ostatnie wykorzystywane do budowy najwyższych elektrowniach przemysłowych [20]. Wieża *TW* zbudowana z tzw. kratownicy i *TW* bazująca na wieży segmentowej zostały przedstawione na Rys. 4-3 [21].

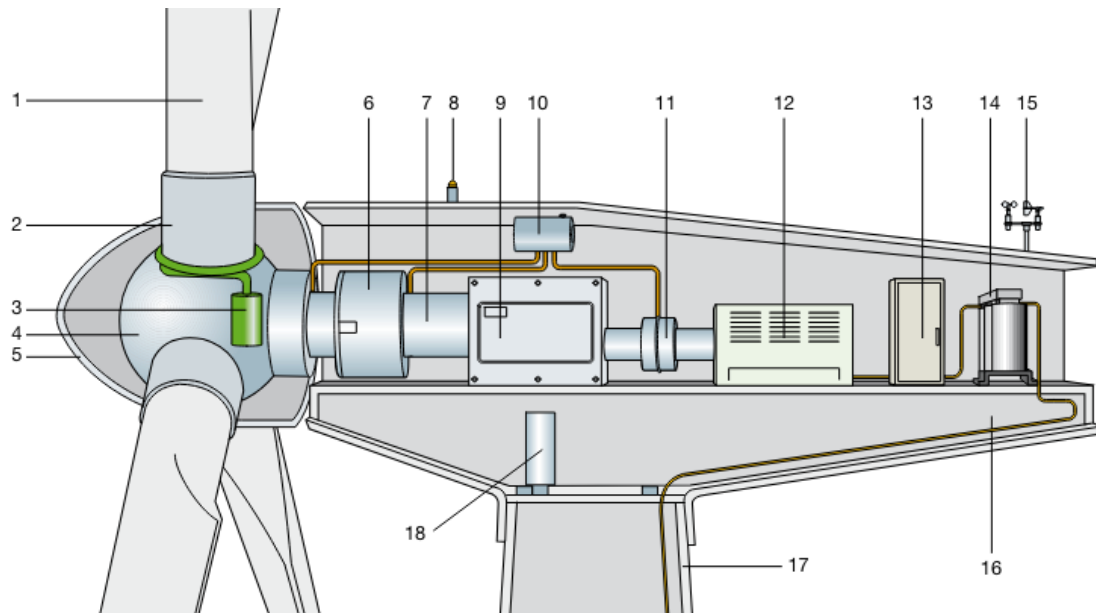


Rys. 4-3 Podstawowy podział rodzaju wież turbin wiatrowych typu onshore: po lewej – kratownica; po prawej – wieża segmentowa (źródło ilustracji: [21]).

Wieża może być źródłem hałasu aerodynamicznego, w wyniku interakcji masy powietrza znajdującej się między wieżą, a poruszającym się śmigłem. Mechanizm generacji hałasu w wyniku przejścia łopaty śmigła obok wieży opisano w Rozdz. 5.1.

4.1.2. Gondola

Gondola stanowi serce turbiny wiatrowej. W jej wnętrzu znajdują się wszystkie istotne urządzenia sterujące, czujniki, przekładnia, generator i aparatura utrzymująca turbinę we właściwej sprawności technicznej (m.in. chłodnice, sprężarki, olejarki). Główne elementy i urządzenia znajdujące się w gondoli turbiny wiatrowej przedstawia Rys. 4-4 [21].



Rys. 4-4 Schemat rozmieszczenia urządzeń znajdujących się w gondoli turbiny wiatrowej (źródło ilustracji: [21]).

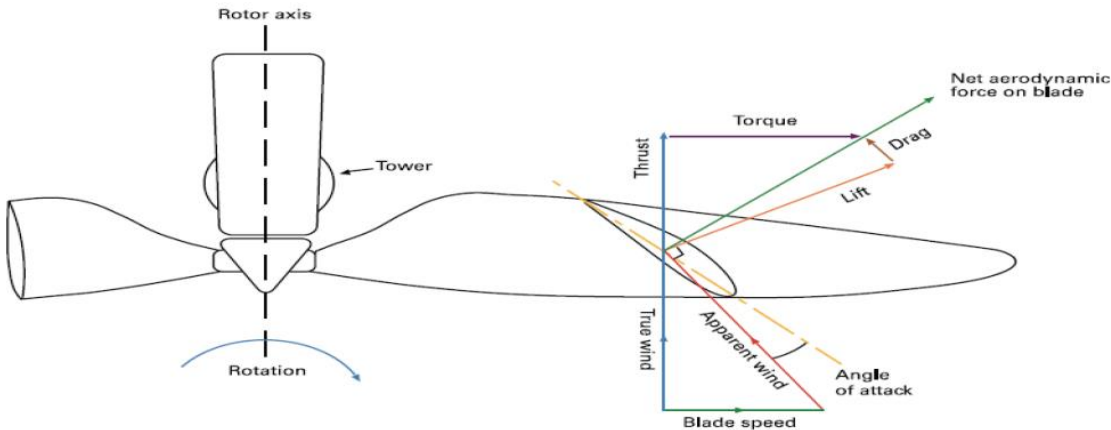
Wytłumaczenie oznaczeń i opis najważniejszych elementów przedstawiono w Tab. 4-1 poniżej.

Tab. 4-1 Opis urządzeń znajdujących się w gondoli turbiny wiatrowej. Tabela nawiązuje do Rys. 4-4

Oznaczenie	Opis
1, 2	łopata i podstawa łopaty śmigła
3	kontroler kąta natarcia łopat (α)
4	piasta
5	główny wał
6, 7	łożysko i wał główny
8	światło ostrzegawcze
9	przekładnia
10	kontroler hamulców
11	centrala chłodnicza
12	generator prądotwórczy
13	urządzenia elektryczne, konwerter energii, sterowniki, bezpieczniki
14	transformator
15	anemometr
16, 17	podstawa gondoli i wieża
18	kontroler obrotu gondoli w płaszczyźnie poziomej

Łopaty turbiny wiatrowej w wyniku działania siły nośnej zamieniają energię kinetyczną wiatru na ruch obrotowy piasty, do której przytwierdzone jest śmigło [20]. Piasta jest połączona z przekładnią i generatorem. Wygenerowany prąd trafia do zespołu urządzeń elektrycznych takich jak konwerter energii, sterowniki czy transformator [19]. Za optymalizację pracy turbiny odpowiadają dwa urządzenia: kontroler kąta natarcia łopat (ang. *angle of attack*) oraz kontroler obrotu gondoli w płaszczyźnie poziomej (ang. *yaw*).

Pierwszy odpowiada za zmianę kąta natarcia α stanowiącego kąt między kierunkiem napływającego powietrza a cięciwą profilu aerodynamicznego łopaty. Rys. 4-5 przedstawia graficzną interpretację kąta natarcia α . Rysunek zapożyczono z [22].



Rys. 4-5 Schemat przekroju łopaty przedstawiający kąt natarcia łopaty (angle of attack) oraz wektor siły nośnej (lift).
(źródło ilustracji: [22])

Zmniejszenie kąta α pracującej turbiny, redukuje prędkość obrotową śmigła, a tym samym siłę nośną śmigła. Zwiększenie kąta natarcia α (aż do wartości granicznej) powoduje przyspieszenie obrotów śmigła i zwiększenie produkowanej energii elektrycznej. Kiedy kąt natarcia przekroczy wartość graniczną i jest zbyt duży, łopata zaczyna hamować ruch obrotowy śmigła. W ten sposób można sterować m.in. prędkością obrotową, a w rezultacie ilością generowanej energii. Kąt natarcia łopaty α jest sterowany automatycznie na podstawie wartości zarejestrowanych przez urządzenia pomiarowe (anemometry) na dachu gondoli. Przykładowo, gdy turbina rozpoczyna pracę lub gdy wiatr ma bardzo niską prędkość – wtedy kąt natarcia α zwiększa się, tworząc dużą powierzchnię kontaktu z nacierającymi masami powietrza i zwiększając siłę nośną. W innym przypadku, przy dużych prędkościach wiatru – kąt natarcia jest redukowany. Prędkość obrotowa zmniejsza się, po to by nie przeciążyć układu prądotwórczego oraz nie doprowadzić do uszkodzeń mechanicznych w wyniku zbyt dużych obciążeń elementów TW. Kontroler kąta α może służyć również jako awaryjny wyłącznik turbiny - ustawiając łopaty pod kątem powodującym minimalizację siły nośnej i wytracanie prędkości obrotowej [19].

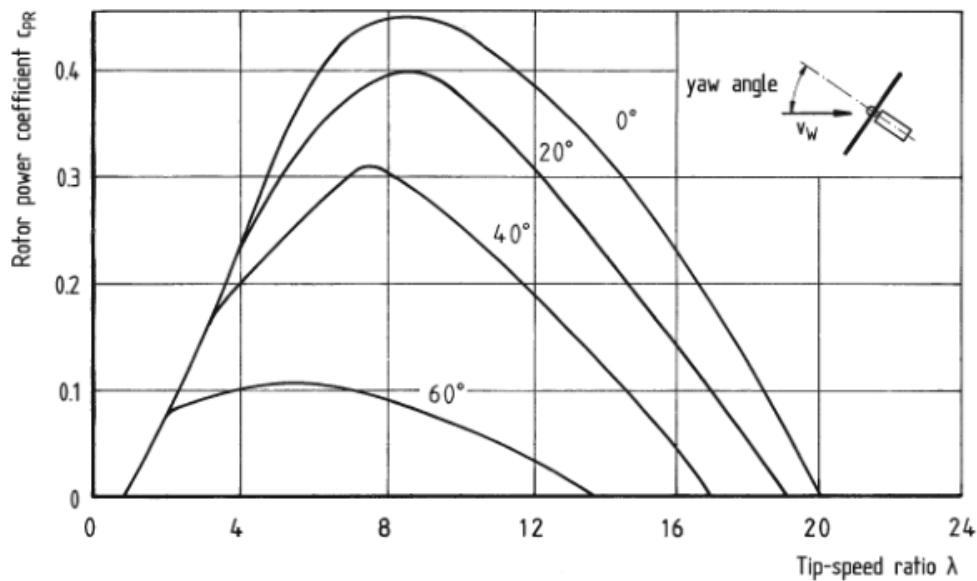
Kontroler obrotu gondoli w płaszczyźnie poziomej (ang. yaw) służy do obrotu gondoli w stronę wiejącego wiatru tak by wiatr zawsze od strony nawietrznej TW wg wz. 1:

$$|\beta_{WT} - \beta_W| \rightarrow 0^\circ. \quad \text{wz. 1}$$

gdzie: β_{WT} – jest kątem obrotu turbiny względem północy.
 β_W – jest kierunkiem wiatru względem północy.

W celu uzyskania maksymalnej ilości wyprodukowanego prądu gondola powinna być skierowana przeciwnie do kierunku wiatru. Kąt β_{WT} jest regulowany na bieżąco, w krótkich interwałach niezbędnych do zarejestrowania przez aparaturę pomiarową (anemometry) zmiany

kierunku wiatru β_W . Na Rys. 4-6 przedstawiono współczynnik mocy $TW C_{PR}^3$ w zależności o kąta obrotu gondoli względem kierunku wiatru [20].



Rys. 4-6 Sprawność TW wyrażona współczynnikiem C_{PR} w zależności od prędkości obrotowej śmigła i kąta β_{WT} (oznaczenie: yaw angle). Źródło ilustracji: [20]

Maksymalna teoretyczna sprawność TW , $C_{PR,max}$ jest ograniczona tzw. granicą Betza [23] i wynosi 59,3%. Współczesne turbiny wiatrowe o najwyższej sprawności osiągają sprawność C_P w granicach 45% - 50% [24].

Gondola jest głównym źródłem tzw. hałasu mechanicznego TW . Urządzenia pracujące w jej wnętrzu, tj. (oznaczenia nawiązują do Rys. 4-4):

- kontroler kąta natarcia (ozn. 3),
- piasta (ozn. 4),
- łożysko (ozn. 6),
- przekładnia (ozn. 9),
- kontroler hamulców (ozn. 10),
- centrala chłodnicza (ozn. 11),
- generator prądotwórczy (ozn. 12),
- urządzenia elektryczne, konwerter energii, sterowniki, bezpieczniki (ozn. 13),
- transformator (ozn. 14),
- kontroler obrotu gondoli w płaszczyźnie poziomej (ozn. 18);

stanowią jednostkowe źródła hałasu. Opis hałasu mechanicznego i mechanizmów jego powstawania zawarto w rozdz. 5.2.

³ C_{PR} lub C_P – współczynniki mocy turbiny: określa, jaka część energii kinetycznej wiatru przechodzącej przez powierzchnię topat zostaje zamieniona w energię kinetyczną ruchu obrotowego piasty.

4.1.3. Łopata turbiny wiatrowej

Łopata turbiny wiatrowej to najważniejszy element *TW* służący zamianie energii kinetycznej wiatru na siłę nośną (ang.: *lift*) wprawiającą w ruch śmigło turbiny. Siłę nośną definiuje się jako (wz. 2):

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad \text{wz. 2}$$

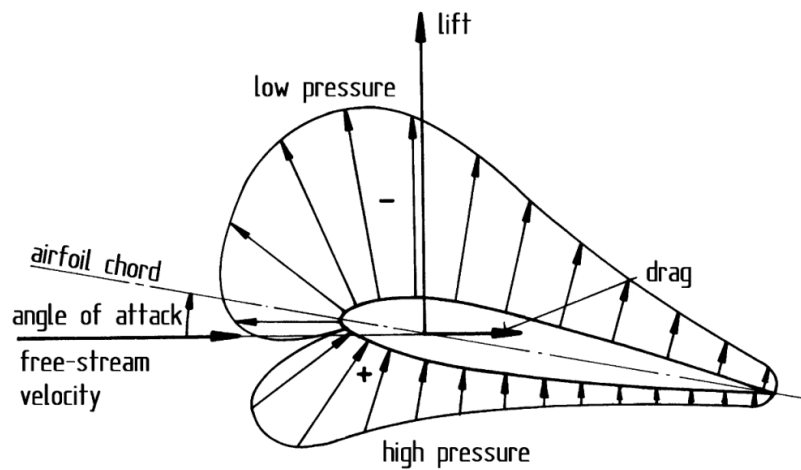
gdzie: ρ – gęstość powietrza,

v – rzeczywista prędkość obrotu w ośrodku (powietrzu) definiowana jako $v^2 = (v_w - v_r)^2$, gdzie v_w – prędkość wiatru, v_r – prędkość obrotu śmigła .

S – powierzchnia łopaty

C_L – współczynnik siły nośnej (*lift coefficient*) zależny od profilu aerodynamicznego i kąta natarcia α .⁴

Profil aerodynamiczny (ang. *airfoil*) to specyficznie zaprojektowany przekrój śmigła, który służy do uzyskiwania optymalnej wartości siły nośnej z opływającego go powietrza. Podstawowy kształt profili aerodynamicznych jest płaski od dołu i zaoblony z góry. Rys. 4-7 przedstawia profil aerodynamiczny łopaty z naniesionymi wektorami siły nośnej (*lift*) i oporu aerodynamicznego (*drag*). Oznaczono również cięciwę profilu (*airfoil chord*), kierunek prędkości wiatru (*free-stream velocity*) oraz kąt natarcia α (*angle of attack*) [20].



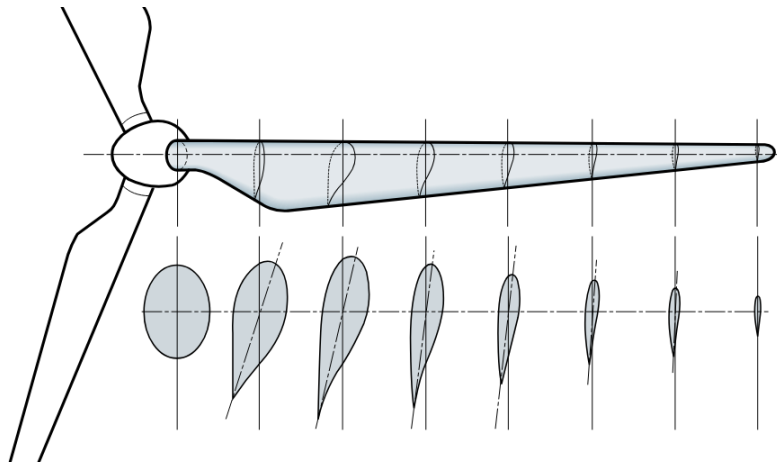
Rys. 4-7 Przekrój przez łopatę śmigła z oznaczeniem strefy niskiego i wysokiego ciśnienia oraz wynikającymi z nich siłą nośną (*lift*) i oporem aerodynamicznym (*drag*). Źródło ilustracji: [20]

Działanie profilu aerodynamicznego jest oparte na zasadzie Bernoulliego [25], która w uogólnieniu mówi o tym, że obszary o większej prędkości przepływu charakteryzują się niższym

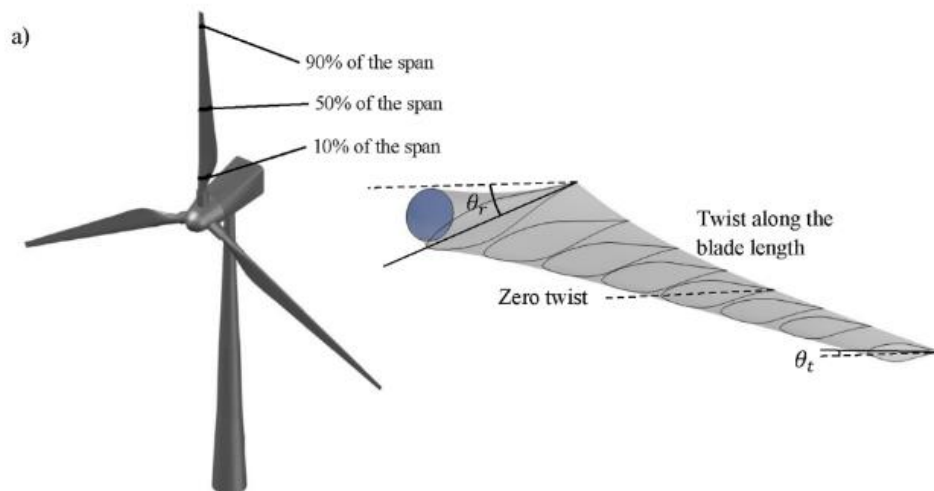
⁴ Współczynnik siły nośnej C_L (ang. *lift*) jest istotnym czynnikiem określającym sprawność *TW*, ponieważ w uproszczeniu jego stosunek do współczynnika oporu aerodynamicznego C_D (ang. *drag*) opisuje wartość współczynnika C_{PR} .

ciśnieniem statycznym. Powietrze opływające łopatę z góry (patrz: Rys. 4-7), ze względu na dłuższą drogę, którą musi przebyć, ma większą prędkość. Powoduje to lokalne zmniejszenie ciśnienia ośrodka. Łopata przemieszcza się (unoszą) w kierunku obszaru podciśnienia tworząc siłę nośną i wywołuje ruch obrotowy śmigła.

Należy zwrócić uwagę, że profil aerodynamiczny łopaty nie ma jednakowego kształtu na całej swojej długości. Przykład zmiany kształtu profilu aerodynamicznego przedstawiono na Rys. 4-8. Dodatkowo z oddalaniem się od osi obrotu cięciwa profilu aerodynamicznego zmienia swój kąt, niejako skręcając cięciwę profilu względem początkowego kąta [26] (patrz: Rys. 4-9). Łopaty kształtuje się by wpłynąć na współczynnik C_L (patrz: wz. 2) w taki sposób by jego wartość korespondowała ze zmieniającą się prędkością obrotową wzdłuż całej długości łopaty, a siła nośna była taka sama dla każdego jej fragmentu.



Rys. 4-8 Przekrój profilu aerodynamicznego łopaty w różnych odległościach od osi obrotu śmigła (źródło ilustracji: [21])



Rys. 4-9 Przykład zmiany kąta cięciwy profilu aerodynamicznego (airfoil) wzdłuż łopaty (źródło ilustracji: [26])

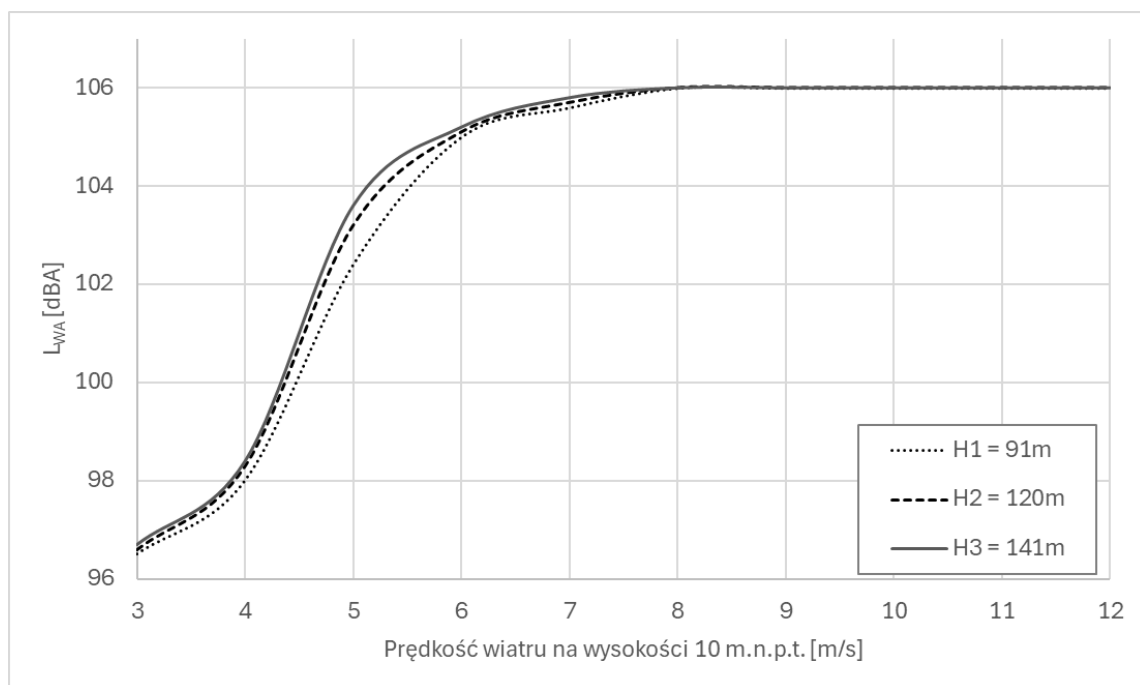
Ustawienie optymalnego kąta natarcia pozwala zmaksymalizować ilość generowanej energii lub zredukować hałas poprzez utrzymanie laminarnego przepływu mas powietrza wokół łopaty

śmigła. Przy zbyt dużym kącie natarcia α warstwa przyścienna wiatru odrywa się od łopaty. Powstaje wtedy tzw. przeciągnięcie, którego rezultatem jest spadek siły nośnej i zwiększenie się siły oporu aerodynamicznego. Oprócz spadku prędkości obrotowej wywołuje to turbulencje, które są źródłem hałasu aerodynamicznego opisanego w Rozdz. 5.1.

5. Turbina wiatrowa jako źródło hałasu

Podstawowym parametrem określającym źródło hałasu jest poziom mocy akustycznej L_{WA} . Jest to wartość uniwersalna, opisująca źródło hałasu w praktyczny sposób, ponieważ na jego podstawie możliwe jest obliczenie poziomu hałasu w dowolnej odległości od źródła.

W przypadku *TW* do wyznaczenia poziomu mocy akustycznej wykorzystuje się metodę pomiarową opisaną w normie 61400-11 [27]. Z uwagi na fakt, że *HTW* zależy od panujących warunków meteorologicznych, szczególnie prędkości wiatru, poziom mocy akustycznej wyznacza się w postaci funkcji L_{WA} od średniej prędkości wiatru oraz maksymalnej mocy $L_{WA,max}$, często określanej także mocą nominalną. Przykład krzywej mocy dla *TW* typu Nordex N117/3000 [28], której moc $L_{WA,max} = 106$ dBA przedstawiono na Rys. 5-1.



Rys. 5-1 Krzywe poziomu mocy akustycznej *TW* Nordex N117/3000. Krzywe różnią się ze względu na różną wysokość wieży (w m.n.p.t.). Średnica śmigła każdego typu *TW* jest równa 117 m.

Moc akustyczna *TW* rośnie się wraz ze wzrostem prędkości wiatru co jest związane ze zwiększeniem prędkości obrotowej śmigła. Gdy prędkość wiatru osiągnie wartość graniczną, tzw. *cut-off speed*, L_{WA} stabilizuje się i nie zwiększa się wraz z dalszym wzrostem prędkości wiatru. Poziom mocy akustycznej L_{WA} zmierzony dla granicznej prędkości wiatru stanowi nominalny poziom mocy akustycznej *TW*, $L_{WA,max}$. Za zatrzymanie wzrastającej zależności poziomu mocy akustycznej L_{WA} odpowiedzialne są systemy bezpieczeństwa sterujące pracą *TW*.

Hałas turbin wiatrowych dzieli się na dwie kategorie:

- 1) Hałas mechaniczny - mechaniczne komponenty elektrowni wchodzące ze sobą w interakcje (hałas mechaniczny). Hałas mechaniczny został opisany w Rozdz. 5.2;

- 2) Hałas aerodynamiczny – hałas, którego źródłem są turbulencje powstające na krawędziach łopat lub wokół wieży turbiny wiatrowej. Hałas aerodynamiczny został opisany w Rozdz. 5.1;

Szczegółowy opis mechanizmów generacji *HTW* opisano w następujących rozdziałach.

5.1. Hałas aerodynamiczny

Hałas aerodynamiczny to jeden z dwóch głównych rodzajów hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe. Mechanizmy wpływające na jego powstawanie związane są z interakcją przepływającego powietrza z poruszającym się śmigłem oraz wieżą. Hałas aerodynamiczny może mieć charakter szerokopasmowy (ang. *broadband noise*) [29], [30], [31] lub tonalny (ang. *tonal noise*) [31], [32]. Szerokopasmowy komponent hałasu aerodynamicznego uzyskuje maksymalne poziomy w zakresie 1000 Hz [20] i powstaje na skutek turbulentnego przepływu powietrza wokół łopaty. Składowe tonalne najczęściej są wynikiem bardzo dużej prędkości obrotowej końcówki łopaty (ang. *tip*), która „rozcina” powietrze, generując charakterystyczny świst. Mechanizmy powstawania hałasu aerodynamicznego opisano w kolejnych rozdziałach.

5.1.1. Hałas krawędzi sptywu (*trailing edge noise*)

Hałas krawędzi sptywu powstaje w wyniku oderwania się warstwy przyściennej (ang. *boundary layer*) od tylnej krawędzi łopaty, tzw. krawędzi sptywu (ang. *trailing edge*), i powstawaniu wirów powietrznych – turbulencji [19], [33]. Hałas krawędzi sptywu jest dominującym mechanizmem hałasu aerodynamicznego i prowadzi do powstawania szerokopasmowego dźwięku w zakresie 500 Hz – 1000 Hz [31], [32], [34]. Poziom hałasu krawędzi sptywu, który powstaje na łopatach opadających ma większą amplitudę niż hałas generowany przez łopaty wznoszące się [31]. Efekt prezentuje Rys. 5-2, na którym zaprezentowano turbinę wiatrową zbadaną kamerą akustyczną [31]. W przypadku stabilnych warunków atmosferycznych na powstawanie hałasu krawędzi sptywu silnie wpływa nieodpowiednio dobrany kąt natarcia α .



Rys. 5-2 Lokalizacja głównego elementu TW stanowiącego źródło hałasu krawędzi sptywu - łopata opadająca (źródło ilustracji: [31])

5.1.2. Hałas krawędzi wiodącej (*leading edge noise*)

Hałas krawędzi wiodącej (ang. *leading edge noise*) powstaje, gdy obracająca się łopata natrafia na turbulentny obszar napływającego powietrza [33]. W wyniku tej interakcji dochodzi do wygenerowania niskoczęstotliwościowego dźwięku (infradźwięku) z maksimum w okolicy 10 Hz [35]. Poziom hałasu krawędzi wiodącej jest zależny od siły turbulencji.

5.1.3. Hałas końcówki łopaty (*tip noise*)

Zasada rządząca mechanizmem *tip noise* jest analogiczna do powstawania hałasu krawędzi sptywu, jednakże występuje na czubku śmigła. Za powstawanie tego rodzaju hałasu odpowiedzialna jest geometria czubka łopaty i jej prędkość obrotowa. Śmigło turbiny wiatrowej wykonuje pełny obrót w około 3-4 sekundy. Biorąc pod uwagę długość łopaty, która w popularnych 2 MW turbinach wynosi ok. 45-50 m, prędkość na końcu każdej z nich wynosi ok. 80 m/s co przekłada się na ok. 288 km/h. Na zakończeniu łopaty punktowo powstają obszary nadciśnienia (przed czubkiem) i podciśnienia (za nim) [19], [33]. Zjawisko przypomina mechanizm kawitacji. Natychmiastowy powrót ośrodka do stanu równowagi za końcówką łopaty powoduje powstawanie wysokoczęstotliwościowego dźwięku, zbliżonego do tonu z zakresu między 1000 Hz a 4000 Hz [32]. Hałas końcówki nie jest dominującym źródłem hałasu aerodynamicznego [31] jednak często wskazuje się, że jest dokuczliwy.

5.1.4. Hałas wywołany niestabilnością atmosferyczną

Hałas aerodynamiczny powstaje również w wyniku turbulentnego napływu mas powietrza na śmigło turbiny wiatrowej. W wyniku dużego gradientu prędkości wiatru w funkcji wysokości śmigło jest poddawane nierównomiernemu obciążeniu. Odcinek łopaty znajdujący się w górze jest odginany przez napływające masy powietrza. Po wykonaniu obrotu i znalezieniu się w dolnej

orientacji łopata, w wyniku zmniejszonego naporu powietrza, wraca do stanu równowagi, co wywołuje sprężysty ruch prostopadle do swojej długości. Dodatkowo łopata znajdująca się nad gondolą będzie miała większą prędkość od łopaty znajdującej się poniżej gondoli. Powstające w ten sposób drgania śmigła zaburzają laminarność ośrodka wokół *TW*. Niestabilność warunków atmosferycznych może wywoływać lub wzmacniać pozostałe mechanizmy generacji hałasu aerodynamicznego [19].

5.1.5. Hałas wywołany interakcją śmigła z wieżą

W momencie przejścia łopaty obok wieży, spowolnione masy powietrza zostają skompresowane na płaszczyźnie wieży powodując powstanie lokalnego obszaru nadciśnienia. Dalej, po przejściu łopaty obok wieży sprężone powietrze zostaje gwałtownie rozprężone. Niniejszy mechanizm jest odpowiedzialny za powstawanie niskoczęstotliwościowego impulsowego hałasu pojawiającego się z częstotliwością przejścia łopat obok wieży [36], [37]. Schemat tego procesu został przedstawiony na Rys. 5-3. Przy pomocy tego mechanizmu można tłumaczyć powstawanie tzw. modulacji amplitudowej hałasu turbin wiatrowych [34]. Na interakcje między śmigłem i wieżą wpływają również niestabilne warunki atmosferyczne [19]. Hałas wywołany interakcją śmigła z wieżą jest często wskazywany jako źródło hałasu infradźwiękowego.

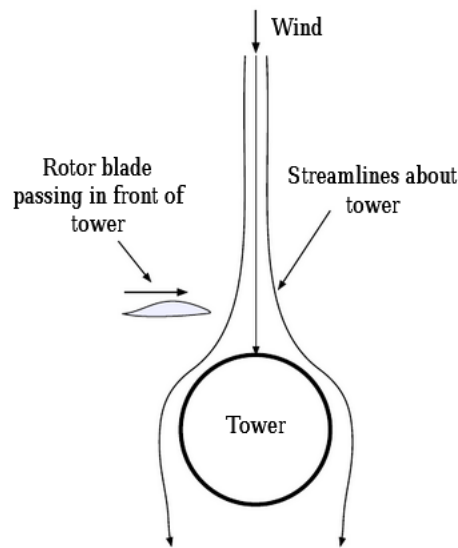


Figure 3. Blade tower interaction

Rys. 5-3 Schemat mechanizmu powstawania hałasu w wyniku interakcji wieży, łopaty i napływającej masy powietrza (wiatru) (źródło ilustracji: [37])

5.2. Hałas mechaniczny

Źródłem hałasu mechanicznego są urządzenia pracujące w gondoli *TW* (patrz: rozdział 4.1.2). Główne źródła hałasu mechanicznego to:

- przekładnia,
- urządzenia służące do wytwarzania energii elektrycznej (generator, transformator itp.),
- centralne chłodnicze,

- urządzenia sterujące lub wspomagające pracę turbiny.

Głównym źródłem hałasu mechanicznego jest przekładnia, zaraz za nią największy udział ma generator prądotwórczy [19]. Hałas powstaje w wyniku tarcia komponentów, dlatego najczęściej stosowaną metodą redukcji hałasu jest regularne smarowanie.

Hałas przedostający się do środowiska propaguje się przez otwory w ścianach gondoli. Alternatywnie przenosi się drogą materiałową na inne elementy turbiny takie jak wieża, obudowa gondoli czy śmigło, które stają się źródłami wtórnymi. Hałas mechaniczny charakteryzuje się licznymi składowymi tonalnymi [38], które są uznawane za bardziej dokuczliwe niż hałas szerokopasmowy [39].

5.3. Propagacja hałasu turbin wiatrowych

HTW jest silnie zależy od warunków meteorologicznych, szczególnie wiatru. Wiatr wpływa na poziom mocy akustycznej L_{WA} *TW* (patrz: Rys. 5-1), strukturę widmową (patrz: rozdział 5.1) oraz na kierunkowość i zasięg oddziaływania *TW*. Na propagację hałasu *TW* ma również wpływ wilgotność i temperatura powietrza.

5.3.1. Kierunek wiatru

Turbina wiatrowa nie jest źródłem wszechkierunkowym. Dominujący kierunek propagacji *HTW* jest zgodny z kierunkiem napływu wiatru. Dodatkowo, *TW* stale kontroluje swój zwrot w taki sposób by był przeciwny do zwrotu wektora prędkości wiatru, co wpływa na maksymalizację produkcji energii (patrz: Rys. 4-6). Turbina generuje hałas podobnie do źródła dwukierunkowego (dipol), zgodnie z osią kierunku wiatru [40], [41], przy czym największe poziomu hałasu turbiny wiatrowej zawsze są rejestrowane po stronie zawietrznej [19], [41]. W pracach [31], [41] wykazano również, że hałas krawędzi spływu (ang. *trailing edge*) może propagować się w osi prostopadłej do kierunku wiatru.

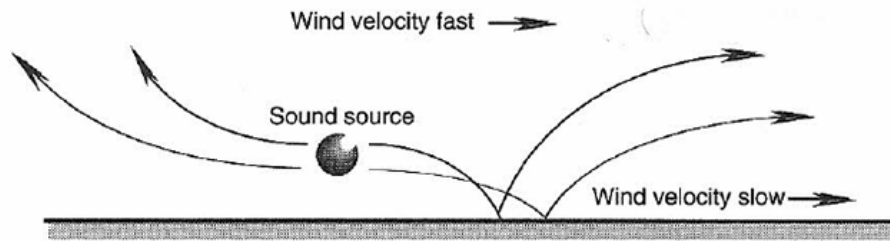
Ciekawe zjawisko zaobserwowano badając kierunkowość głębokości modulacji amplitudowej *HTW*, która nie koresponduje z kierunkowością hałasu mierzonego za pomocą równoważnego poziomu dźwięku. Głębokość modulacji amplitudowej osiągnęła swoje maksimum po stronie nawietrznej około kąta 60° względem kierunku wiatru [42]. Może za to odpowiadać mechanizm interakcji śmigła z wieżą opisany w Rozdz. 5.1.5. Źródło tego rodzaju hałasu zlokalizowane jest po stronie nawietrznej *TW*.

5.3.2. Gradient prędkości wiatru

Gradient prędkości wiatru (ang. *wind shear*) opisuje zmianę prędkości wiatru w funkcji wysokości nad ziemią. Im bliżej powierzchni ziemi tym prędkość wiatru jest mniejsza przez tzw. szorstkość terenu (tzw. *roughness length* [43]). Wysoki gradient prędkości wiatru (duża prędkość wysoko nad powierzchnią ziemi, mała prędkość blisko poziomu terenu) powoduje turbulentny przepływ mas powietrza wokół turbiny. Turbulencje są jedną z głównych przyczyn powstawania hałasu aerodynamicznego [44]. Dodatkowo duży gradient prędkości wiatru powoduje nierówne

obciążenie śmigła: łopata znajdująca się w górze porusza się w szybciej przepływających masach powietrza niż łopata znajdująca się w dole (patrz: rozdział 5.1.4). Taka różnica w obciążeniu śmigła wywołuje drgania łopat poprzecznie do kierunku ich obrotu co stwarza prawdopodobieństwo powstania modulacji amplitudowej [34], [45].

Przy dużym gradiencie prędkości wiatru kierunek fal akustycznych propagujących się ku górze i na boki zostaje zakrzywiony zgodnie z kierunkiem wiatru [19], [46]. Zakrzywianie kierunku propagacji fal dźwiękowych prezentuje Rys. 5-4. Zjawisko to może prowadzić do powstawania tzw. cienia akustycznego po nawietrznej stronie turbiny wiatrowej.



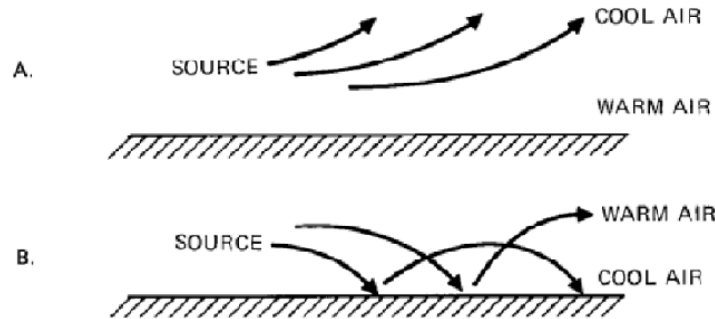
Rys. 5-4 Zmiana kierunku propagacji hałasu spowodowana występowaniem silnego gradientu prędkości wiatru.
(źródło ilustracji: [46])

5.3.3. Gradient temperatury i refrakcja

Gradient temperatury opisuje zmianę temperatury powietrza wraz ze wzrostem wysokości ponad gruntem. W normalnych warunkach blisko powierzchni ziemi temperatura jest wyższa niż temperatura wysoko nad ziemią. W takiej sytuacji fale dźwiękowe w wyniku refrakcji uginają się do góry w kierunku niższego ciśnienia. Mówi się wtedy o występowaniu ujemnego gradientu temperatury [19].

Jeżeli nastąpi inwersja temperatury (np. o poranku) to sytuacja zostanie odwrócona. Inwersja temperatury następuje gdy w dolnej troposferze temperatura rośnie wraz z wysokością. Najczęściej występuje to w pogodne, bezwietrzne noce wskutek silnego wychłodzenia podłoża.

Po wystąpieniu inwersji temperatura powietrza przy podłożu jest niższa niż w górnych partiach atmosfery. Skutkuje to zmianą kierunku („odginaniem się”) propagujących się fal dźwiękowych ku dołowi, w kierunku ziemi [47]. W takiej sytuacji mówi się o dodatnim gradiencie temperatury. W warunkach dodatniego gradientu temperatury hałas, w wyniku refrakcji, będzie propagować się dalej niż w warunkach normalnych przy ujemnym gradiencie temperatury [19].



Rys. 5-5 Zmiana kierunku propagacji hałasu w powietrzu o dużym gradiencie temperatury. A -normalne warunki propagacji, ujemny gradient temperatury; B - inwersja temperatury i zwiększenie zasięgu propagacji hałasu, dodatni gradient temperatury. (źródło ilustracji: [47])

Inwersja temperatury, obserwowana np. podczas cyklu dobowego, przyczynia się do powstawania różnic w gęstości powietrza na różnych wysokościach nad ziemią i turbulentnego przepływu wiatru wokół *TW*. To prowadzi do powstawania impulsowych dźwięków przypominających sygnał zmodulowany amplitudowo [48], szczególnie w porze nocnej (więcej: rozdz. 5.4.1).

5.4. Charakterystyka hałasu turbin wiatrowych

We wcześniejszych rozdziałach przedstawiono mechanizmy powstawania hałasu turbin wiatrowych i charakterystykę generowanych przez nie dźwięków. W nawiązaniu do nich hałas turbiny wiatrowej można podsumować jako:

- szerokopasmowy szum o maksimum w częstotliwości 1 000 Hz,
- zawierający komponenty tonalne w zakresie 1 000 Hz – 4 000 Hz,
- zawierający komponenty niskoczęstotliwościowe i potencjalnie infradźwiękowe,
- silnie zależny od warunków atmosferycznych, w szczególności w kwestii kierunkowości źródła i poziomu mocy akustycznej.

Na Rys. 5-6 przedstawiono średnie widma *HTW* skorygowane krzywą korekcyjną A dwóch *TW*, o mocy ≤ 2.0 MW i > 2.0 MW [49]. Widma ważone krzywą korekcyjną A wyznaczono na podstawie pomiarów 45 turbin wiatrowych o mocach między 75 kW do 3,6 MW. Pomimo różnic w mocy urządzeń, zmierzone widma *HTW* w pasmach tercjowych, mają bardzo zbliżony udział w całkowitym poziomie mocy akustycznej.

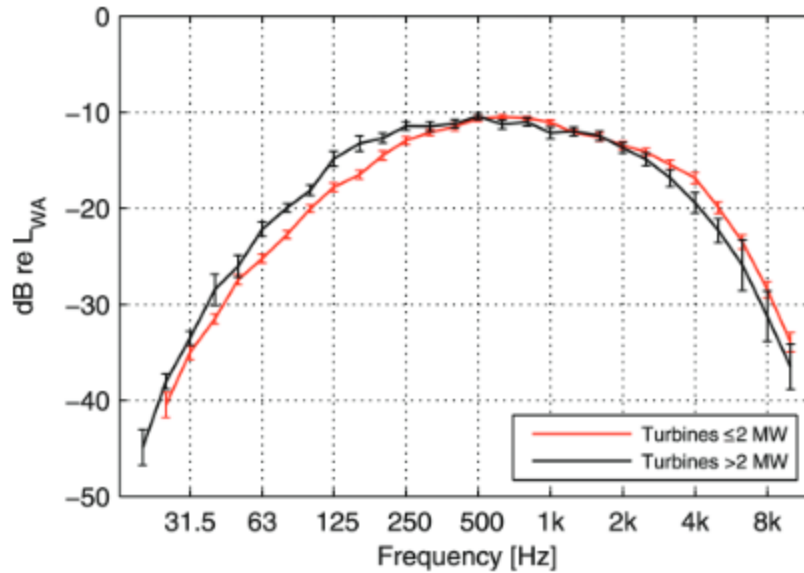


FIG. 4. (Color online) Normalized A-weighted apparent sound power levels in one-third-octave bands, means of two groups of turbines: ≤ 2 MW and > 2 MW. Error bars indicate ± 1 standard error of mean.

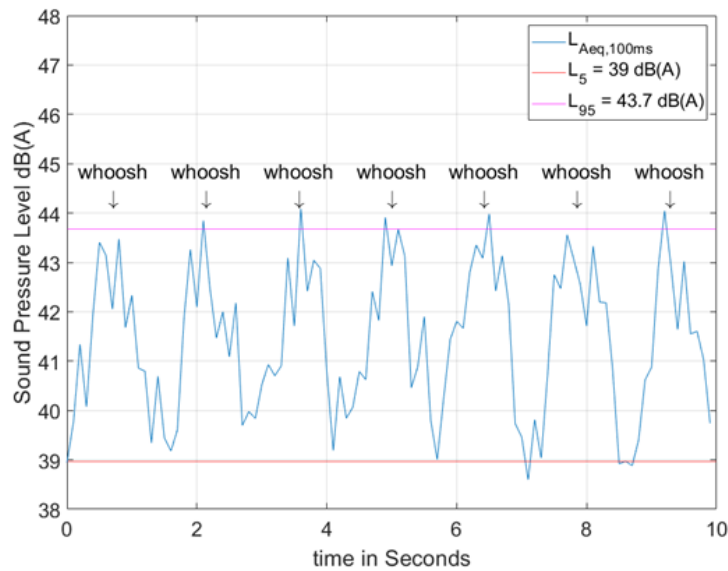
Rys. 5-6 Średnie widma HTW ważone krzywą korekcyjną A elektrowni o różnej mocy. Ilustracja pochodzi z pracy [49]

5.4.1. Modulacja amplitudowa HTW

Aerodynamiczny komponent HTW cechuje się występowaniem modulacji amplitudowej (ang. *amplitude modulation* - AM). Definiuje się ją jako okresową fluktuację poziomu hałasu emitowanego przez TW. Częstotliwość fluktuacji (modulacji) jest związana z częstotliwością przejścia łopat kół wieży [50], [51]. Najczęściej częstotliwość modulacji mieści się w przedziale 0,8 – 1,0 s.

Innym wytłumaczeniem powstawania modulacji amplitudowej jest okresowa zmiana poziomu emisji hałasu aerodynamicznego wywołanego opadaniem i unoszeniem się łopat w ruchu obrotowym śmigła [52]. Mechanizm został opisany wcześniej (patrz: rozdział 5.1.1).

Przykład modulacji amplitudowej w sygnale HTW prezentuje Rys. 5-7.



Rys. 5-7 Przedstawienie modulacji amplitudowej hałasu turbiny wiatrowej na przebiegu czasowym. Ilustracja pochodzi z witryny [53]

Modulację amplitudową *HTW* określa się także za pomocą głębokości modulacji (ang. *AM depth*). Określa się ją jako różnicę między wartością minimalną i maksymalną chwilowego poziomu dźwięku turbiny wiatrowej. Do określania głębokości modulacji najczęściej stosuje się różne metody obliczeniowe [51], [54].

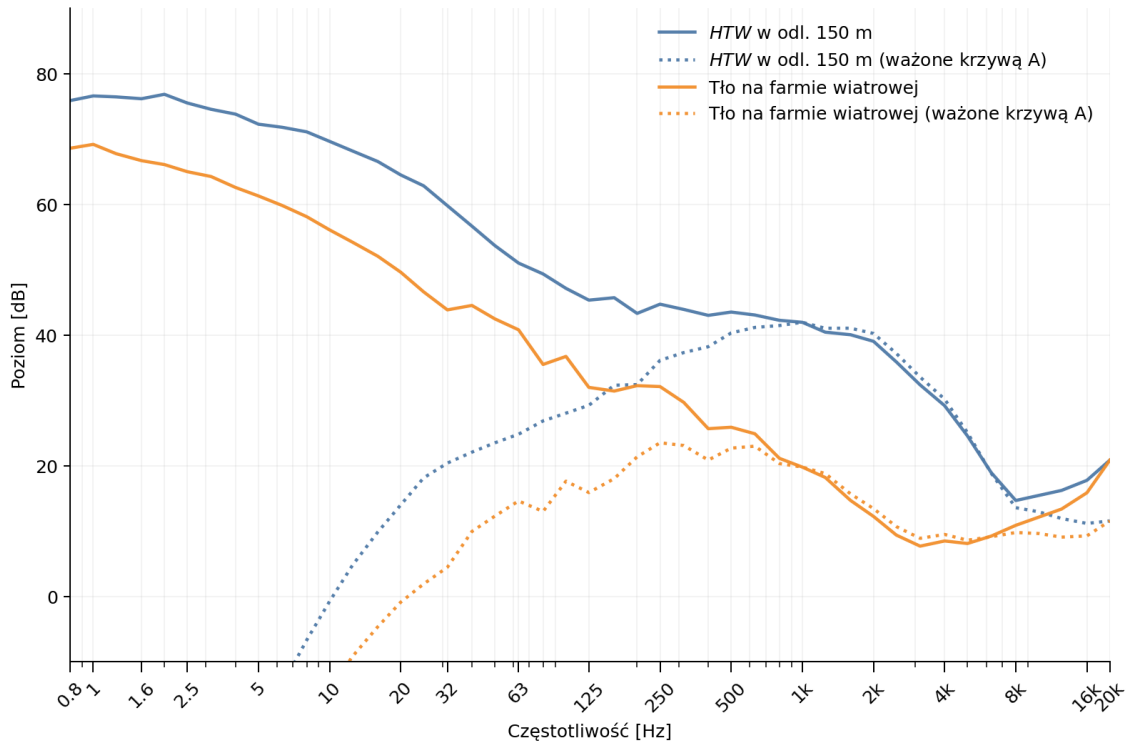
W niektórych krajach regulacje prawne przewidują stosowanie „kar”, czyli ustalonej wartości w dB dodawanej do poziomu dźwięku w punkcie immisji [51], [55]. W Polsce prawo nie przewiduje kar za występowanie modulacji amplitudowej w emitowanym hałasie (patrz: rozdz. 6).

Modulacja amplitudowa jest bardzo ważnym zjawiskiem towarzyszącym *HTW*, ponieważ uznaje się ją za jedną z głównych przyczyn dokuczliwości wywołanej dźwiękiem [56]. Sygnaty zmodulowane amplitudowo są również dużo lepiej spostrzegane przez osoby biorące udział w badaniach nad detekcją dźwięku na tle dźwięków maskujących [57]. Z tego powodu uważa się, że turbiny wiatrowe wywołują dokuczliwość u ogółu populacji przy dużo niższych poziomach niż pozostałe źródła hałasu [58].

Typowa modulacja amplitudowa, rozumiana jako okresowe zmiany poziomu ciśnienia akustycznego wywołane ruchem obrotowym śmigła mogą przybrać formę tzw. wzmocnionej modulacji amplitudowej (ang. *enhanced amplitude modulation* - *EAM*), która może być rzeczywistą przyczyną dokuczliwości i niekorzystnych skutków zdrowotnych wywołanych przez *HTW* [44]. *EAM* powstaje podczas specyficznych warunków meteorologicznych, np. przy dużym gradiencie prędkości wiatru. Wywołuje to nierówne obciążenie łopat, a tym samym brak możliwości optymalnego dopasowania kąta natarcia α [44]. *EAM* jest słyszalna w bardzo dużych odległościach, nawet kilku kilometrów od turbiny wiatrowej [59].

5.4.2. Infradźwięki

Hałas turbin wiatrowych charakteryzuje się wysokimi poziomami hałasu w zakresie niskich częstotliwości i infradźwięków [60], [61]. Rys. 5-8 prezentuje widmo *HTW* i tła akustycznego zmierzone podczas pomiarów akustycznych (patrz: rozdział 13.1.1) przeprowadzonych w ramach projektu HETMAN [6]. Wykres przedstawia widma równoważnych 10-minutowych poziomów hałasu, przedstawionych w pasmach tercjowych, ważone krzywą A oraz w SPL. Pomiary przeprowadzono dla pełnego dostępnego zakresu pomiarowego miernika SVAN 979, tj. 0.8 – 20000 Hz.



Rys. 5-8 Widmo *HTW* oraz tła akustycznego. Przedstawiono widma w dB SPL oraz widma ważone krzywą A. Źródło: pomiary własne.

Na podstawie Rys. 5-8 można stwierdzić, że *HTW* zawiera istotny komponent niskoczęstotliwościowy – w paśmie 2 Hz *HTW* ma wartość aż 77 dB. Jednakże porównanie widma *HTW* z widmem tła akustycznego, przy wyłączonej *TW*, ukazuje różnicę poziomów rzędu 10 dB, co jest wartością niewielką. Należy zwrócić też uwagę, że nie ma twardych dowodów na to by infradźwięki poniżej progu detekcji wywoływały negatywne skutki zdrowotne [62].

6. Regulacje prawne związane z hałasem turbin wiatrowych

Ochrona przed hałasem środowiskowym w Polsce jest regulowana przez szereg aktów prawnych. Najważniejszym z nich jest ustawa Prawo Ochrony Środowiska (POŚ) [63]. Ustawa stanowi punkt wyjścia dla kolejnych aktów prawnych i rozporządzeń. Ustawa określa również obowiązki w zakresie monitorowania hałasu i wdrażania środków zaradczych. POŚ definiuje również hałas jako „*Art. 3. Ilekroć w ustawie jest mowa o: (...) hałasie – rozumie się przez to dźwięki o częstotliwościach od 16 Hz do 16 000 Hz*”. W literaturze fachowej rozpatrywany zakres widma dźwięków słyszalnych, do których zalicza się hałas, wynosi od 20 Hz do 20 kHz. Dźwięki o częstotliwościach poniżej 20 Hz nazywa się infradźwiękami, a powyżej 20 kHz – ultradźwiękami.

Głównym celem ochrony przed hałasem wg POŚ jest:

- utrzymanie poziomu hałasu poniżej dopuszczalnego lub co najmniej na tym samym poziomie oraz;
- zmniejszanie poziomu hałasu co najmniej do dopuszczalnego, gdy nie jest on dotrzymany.

W Polsce dokumentem określającym podstawowe standardy środowiskowe jest Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku [7]. Określa się je w celu ochrony ludności przed negatywnymi zdrowotnymi skutkami hałasu. Utrzymywanie emisji hałasu w środowisku poniżej wartości dopuszczalnych jest obowiązkiem Zarządzającego źródłem hałasu. Wartości dopuszczalne różnią się zgodnie z podziałem na typ terenu chronionego przed hałasem oraz rodzaj źródła hałasu. *TW* traktuje się jako „*Pozostałe obiekty i działalność będąca źródłem hałasu*”, zwyczajowo określając je źródła hałasu przemysłowego.

Dokumentem stosowanym do strategicznego planowania rozwiązań naprawczych dla obszarów, na których stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu jest Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie programu ochrony środowiska przed hałasem [64]. Ten akt określa zasady przygotowania strategicznych map hałasu, które tworzy się na okres 5 lat.

W 2016 roku w stosunku do turbin wiatrowych określono szczególny akt prawny: Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych [4], tzw. „Ustawa wiatrakowa” lub potocznie „Ustawa 10H”. Nacisk kładziony na szybkie przeprowadzenie transformacji energetycznej i perspektywa szybkiego zysku przez Inwestorów spowodowały, że w latach poprzedzających wydanie tego aktu, farmy wiatrowe w wielu przypadkach powstawały na terenie Polski bez przeprowadzania koniecznych analiz i konsultacji społecznych. Taki stan rzeczy wywołał oburzenie społeczne, którego rezultatem było ogłoszenie „Ustawy wiatrakowej”, której brzmienie drastycznie ograniczyło możliwość lokalizacji nowych elektrowni wiatrowych. Zgodnie z art. 4 ust. 1: „*odległość w której mogą być lokalizowane i budowane elektrownie wiatrowe od budynku mieszkalnego i na odwrót musi być równa lub większa od dziesięciokrotności wysokości elektrowni mierzonej od poziomu gruntu do najwyższego punktu, uwzględniając*

wirnik z łopatami”. Z punktu widzenia przepisów regulujących ochronę przed hałasem jest to sytuacja bezprecedensowa, bowiem żadne inne źródło hałasu środowiskowego nie zostało objęte innymi ograniczeniami poza koniecznością spełnienia dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku [7].

Mając na uwadze przeciętną wysokość 2 MW turbin wiatrowych lokalizowanych w Polsce, wynoszącą ok. 150 m (patrz: Rozdz. 4), odległość, o której mówi art. 4. „Ustawy wiatrakowej” wynosi prawie 1,5 km. W ten sposób inwestycje w sektorze energetyki wiatrowej praktycznie się zatrzymały. Do 9 marca 2023 r., czyli do wprowadzenia Ustawy liberalizującej prawo o lokalizacji turbin wiatrowych [5] realizowano jedynie inwestycje na które wydano pozwolenia przed 2016 rokiem. Obecnie odległość nowych elektrowni elektrycznych od zabudowy nie może być mniejsza niż 700 m. Wprowadzona zmiana zasługuje na krytykę ze względu na fakt, że ustalona odległość nie jest rezultatem przeprowadzonych badań, a zwykłym założeniem. Kolejny projekt ustawy zmniejszającej odległość lokalizacji turbin wiatrowych od gospodarstw domowych (tym razem do 500 m) przeszedł przez Stały Komitet Rady Ministrów (06.03.2025 r.). Podobnie jak wcześniej, zapisy tej ustawy nie były konsultowane ze środowiskiem naukowym ani specjalistami z dziedziny ochrony przed hałasem. W publikacji [15] wskazuje się, że dalsze zmniejszenie dystansu do 500 metrów mogłoby podwoić dostępny potencjał terenów inwestycyjnych.

Temat turbin wiatrowych i generowanego przez nie hałasu jest w Polsce kontrowersyjny. Dowodami na ten fakt są m.in.:

- duże naciski społeczne, zarówno za oddalaniem turbin od zabudowy mieszkaniowej albo za odblokowaniem terenów pod nowe instalacje;
- częste zmiany prawa – raz ograniczające branżę wiatrową, raz liberalizujące zasady;
- decyzje podejmowane bez oparcia na obiektywnych wskaźnikach (np. na wskaźnikach hałasu).

6.1. Wskaźniki oceny hałasu

Wskaźniki hałasu lub wskaźnik oceny hałasu to zmierzona lub obliczona wielkość fizyczna wykorzystywana przy określaniu poziomu hałasu w środowisku. Wartości wskaźników hałasu określa się w celu stwierdzenia spełnienia standardów jakości środowiska [63] określonych w [7].

Wskaźniki hałasu stosuje się w celu ujednoczenia oceny oddziaływania hałasu na środowisko i zdrowie ludzi w Polsce, ale także w krajach członkowskich Unii Europejskiej. Stosowane w Polsce wskaźniki hałasu odnoszą się do dźwięków słyszalnych w zakresie pasma słyszalnego, skorygowanych krzywą korekcyjną A [63]. Wskaźniki oceny hałasu definiuje art. 112a POŚ określa ich podział według zastosowania na:

1. Wskaźniki długookresowe – *do sporządzania strategicznych map hałasu oraz programów ochrony środowiska przed hałasem,*

2. Wskaźniki dobowe (krótkookresowe) – *do ustalania i kontroli warunków korzystania ze środowiska w odniesieniu do jednej doby.*

Turbiny wiatrowe w polskim prawie są traktowane jako „Pozostałe obiekty i działalność będąca źródłem hałasu” [7]. Dla tzw. źródeł hałasu przemysłowego tego rodzaju źródła określa się wskaźniki dobowe w porze dziennej dla 8 najmniej korzystnych godzin następujących po sobie, a w porze nocnej dla 1 najmniej korzystnej godziny nocy. Wartości wskaźników hałasu określa się na drodze pomiarów lub obliczeń i porównuje się z dopuszczalnymi poziomami hałasu w środowisku [7].

6.1.1. Wskaźniki długookresowe

Wskaźniki długookresowe określają średni poziom dźwięku A w ciągu całego roku dla następujących okresów oceny:

- L_{DWN} – długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach [dB], wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku, z uwzględnieniem pory dnia (rozumianej jako przedział czasu od godz. 06:00 do godz. 18:00), pory wieczoru (rozumianej jako przedział czasu od godz. 18:00 do godz. 22:00) oraz pory nocy (rozumianej jako przedział czasu od godz. 22:00 do godz. 06:00). L_{DWN} definiuje się jako (wz. 3):

$$L_{DWN} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} (12 \cdot 10^{0,1 \cdot L_D} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_W + 5)} + 8 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_N + 10)}) \right] \quad \text{wz. 3}$$

gdzie: L_D – równoważny poziom dźwięku A dla wszystkich pór dnia w roku,
 $L_W + 5$ – równoważny poziom dźwięku A dla wszystkich pór wieczora z poprawką +5dB,
 $L_N + 10$ – równoważny poziom dźwięku A dla wszystkich pór nocy uwzględniający poprawkę +10dB.

Poprawki przy poziomach wieczornych (L_W) i nocnych (L_N) mają odzwierciedlać większą dokuczliwość wywołaną hałasem w tych okresach oceny. Zmusza to do bardziej rygorystycznej kontroli emisji w porach przeznaczonych na odpoczynek i sen.

- L_N – długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach [dB], wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 22:00 do godz. 06:00). L_N jest wykorzystywany przy określaniu prawdopodobieństwa wystąpienia zaburzeń snu.

Wskaźniki L_{DWN} i L_N wykorzystuje się do opracowania strategicznych map hałasu [4] i programów ochrony środowiska przed hałasem (POH) oraz do obliczania wskaźników zdrowotnych [65] określających liczbę osób potencjalnie narażonych na negatywne skutki zdrowotne.

6.1.2. Wskaźniki dobowe

Wskaźniki dobowe określają średni poziom dźwięku A w ciągu jednej doby. Dla turbin wiatrowych, będących „Pozostałymi obiektami i działalnością będącą źródłem hałasu” wskaźniki oceny hałasu definiuje się dla następujących okresów oceny:

- L_{AeqD} – równoważny poziom dźwięku A dla pory dnia (rozumianej jako przedział czasu odniesienia równy 8 najmniej korzystnym godzinom pory dnia kolejno po sobie następującym),
- L_{AeqN} – równoważny poziom dźwięku A dla pory nocy (rozumianej jako przedział czasu odniesienia równy 1 najmniej korzystnej godzinie nocy).

Wskaźniki hałasu mają zastosowanie do ustalania i kontroli warunków korzystania ze środowiska w odniesieniu do jednej doby.

6.2. Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku

Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku zostały określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. [7]osobno dla każdego rodzaju terenu. Ich wartości w odniesieniu do turbin wiatrowych, z podziałem na rodzaj terenu chronionego przed hałasem zaprezentowano w Tab. 6-1.

Tab. 6-1 Dopuszczalne poziomy hałasu dla turbin wiatrowych będących „Pozostałymi obiektami i działalnością będącą źródłem hałasu”. W tabeli przedstawiono wskaźniki dobowe i długookresowe. Tabela pochodzi z [7].

Rodzaj terenu	Dopuszczalny poziom hałasu w dB		Dopuszczalny długookresowy średni poziom dźwięku A w dB	
	L_{AeqD}	L_{AeqN}	L_{DWN}	L_N
	Przedział czasu odniesienia równy 8 najmniej korzystnym godzinom dnia kolejno po sobie następującym	Przedział czasu odniesienia równy 1 najmniej korzystnej godzinie nocy	przedział czasu odniesienia równy wszystkim dobom w roku	przedział czasu odniesienia równy wszystkim porom nocy
a) Strefa ochronna "A" uzdrowiska b) Tereny szpitali poza miastem	45	40	45	40
a) Tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej b) Tereny zabudowy związanej ze stałym lub czasowym pobytem dzieci i młodzieży c) Tereny domów opieki społecznej d) Tereny szpitali w miastach	50	40	50	40
a) Tereny zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego b) Tereny zabudowy zagrodowej c) Tereny rekreacyjno-wypoczynkowe d) Tereny mieszkaniowo-usługowe	55	45	55	45
Tereny w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców	55	45	55	45

Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku dla turbin wiatrowych są określone w taki sam sposób jak dla pozostałych źródeł hałasu, niezależnie od warunków pogodowych, które istotnie wpływają na poziom mocy i zasięg propagacji hałasu turbin wiatrowych (patrz: Rozdz. 5.3). W niektórych krajach dopuszczalne poziomy hałasu są zależne od panujących warunków [56], [66]. Na przykład w Wielkiej Brytanii, we Francji, Nowej Zelandii i Australii dopuszczalne poziomy hałasu uzależnia się od panującego w punkcie emisji tła akustycznego. W Kanadzie i Danii limity hałasu wyznacza prędkość wiatru.

7. Wpływ hałasu na zdrowie ludzi

Hałas turbin wiatrowych, tak jak każda forma emisji - nie tylko akustycznej, może negatywnie oddziaływać na zdrowie i dobrostan ludzi. Z tego powodu konieczne jest zapobieganie powstawaniu emisji hałasu poprzez opracowanie rozwiązań prawnych (patrz: rozdział 6.) i technicznych na drodze monitorowania (patrz: rozdział 8) i redukcji hałasu (patrz: rozdział 9).

Hałas jest sygnałem akustycznym, który definiuje się jako niepożądane dźwięki w otoczeniu człowieka wywołujące dyskomfort i negatywnie wpływające na jego zdrowie [67]. Od wielu lat prowadzone są regularne badania nad wpływem hałasu na zdrowie ludzi od wszelkich źródeł hałasu środowiskowego [73-83]. Na podstawie wyników tych badań przygotowuje się propozycje dopuszczalnych poziomów hałasu [79], które w rezultacie mają szansę stać się obowiązującymi regulacjami prawnymi [6].

Osoby narażone na hałas o ponadnormatywnym poziomie w miejscu swojego zamieszkania są bardziej narażone na negatywne skutki zdrowotne, takie jak: nadciśnienie tętnicze, niedokrwienna choroba serca, zawał mięśnia sercowego lub udar [87-93]. Głównym czynnikiem wpływającym na występowanie wymienionych negatywnych skutków jest stres i podwyższone stężenie kortyzolu we krwi [83], [87]. Na poziomy stresu mają również wpływ przebudzenia nocne wywołane hałasem [88]. Wskazuje się, że możliwe zaburzenia snu i stres wywołane hałasem wpływają na pogorszenie zdolności kognitywnych i kondycji stanu psychicznego [71], [80], [89], w tym nawet depresji [90]. Badana na szeroką skalę relacja między hałasem środowiskowym i zaburzeniami metabolicznymi [91] oraz płodnością i zdrowiem matek i ich dzieci [92], [93] wskazuje, że hałas jest wyjątkowo niebezpieczny. Równie groźne, lecz (może) mniej dramatyczne skutki zdrowotne, które od razu kojarzą się z ekspozycją na hałas to ryzyko przedwczesnego podwyższenia progów słyszenia oraz wystąpienia szumów usznych [80], [94], [95].

W 2018 roku World Health Organization (WHO) wydało zestaw rekomendacji [79], które powstały w oparciu o analizę szeregu prac naukowych. Praca powstała w celu zdefiniowania najczęściej występujących negatywnych skutków zdrowotnych i określenia prawdopodobieństwa ich wystąpienia w odniesieniu do typowych źródeł hałasu środowiskowego. Skutki zdrowotne opisane w dokumencie przedstawiono w Tab. 7-1. W przypadku każdego negatywnego skutku zdrowotnego określono wagę powikłań wyrażoną wskaźnikiem *disability weight* (DW) określającym prawdopodobieństwo wystąpienia negatywnych powikłań (ang. *disability*) u osób dotkniętych danym skutkiem zdrowotnym. Wskaźnik DW przyjmuje wartości od 0 do 1, gdzie 0 oznacza brak prawdopodobieństwa na wystąpienie powikłań, a 1 oznacza pewność wystąpienia negatywnych następstw. Wartości wskaźnika DW zamieszczone w pracy pochodzą z badań populacyjnych, w których badani byli proszeni o uszeregowanie określonej choroby pod względem jej wpływu na kilka aspektów życia. DW okazują się przydatne w obliczaniu obciążenia chorobą [79].

Tab. 7-1 Niekorzystne skutki zdrowotne wg WHO

Negatywny skutek zdrowotny	Podłoże skutku zdrowotnego	Waga powiktań
Choroba niedokrwienna serca (<i>Cardiovascular disease</i>)	Pozaakustyczne	Bardzo poważne (<i>Critical</i>)
Dokuczliwość (<i>Annoyance</i>)	Pozaakustyczne	Bardzo poważne (<i>Critical</i>)
Zaburzenia snu (<i>Effects on sleep</i>)	Pozaakustyczne	Bardzo poważne (<i>Critical</i>)
Wpływ na zdolności poznawcze (<i>Cognitive impairment</i>)	Pozaakustyczne	Bardzo poważne (<i>Critical</i>)
Ubytki słuchu lub szumy uszne (<i>Hearing loss and tinnitus</i>)	Audiologiczne	Bardzo poważne (<i>Critical</i>)
Wystąpienie powiktań okotoprodowych (<i>Adverse birth outcomes</i>)	Pozaakustyczne	Istotne (<i>Important</i>)
Pogorszenie jakości życia i zdrowia psychicznego (<i>Quality of life, well-being and mental health</i>)	Pozaakustyczne	Istotne (<i>Important</i>)
Problemy trawienne (<i>Metabolic outcomes</i>)	Pozaakustyczne	Istotne (<i>Important</i>)

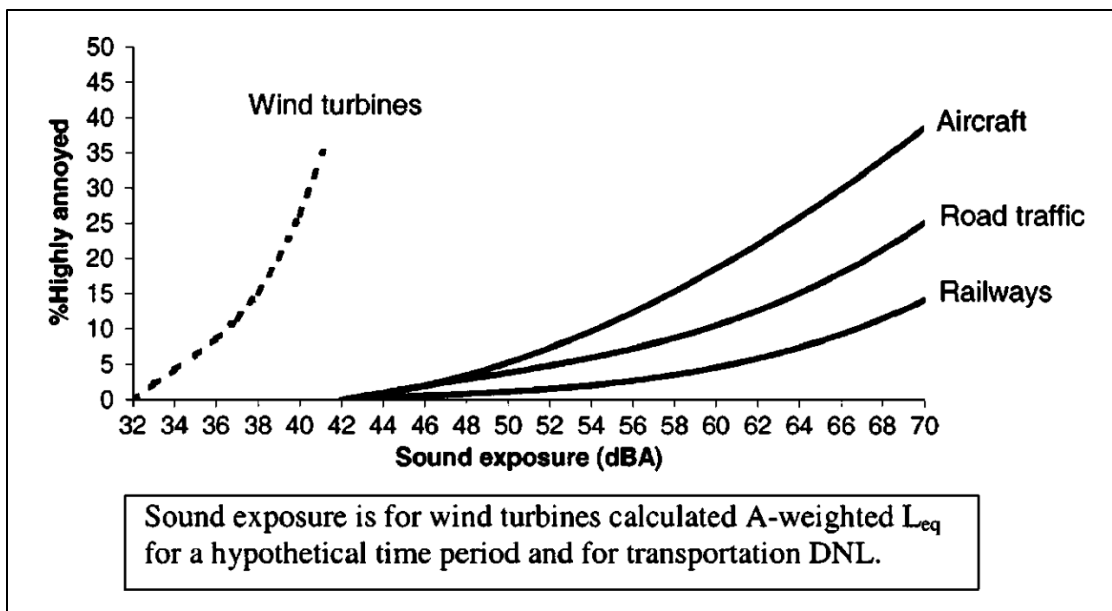
W przewodniku WHO analizowano wpływ hałasu pochodzącego od następujących źródeł:

- hałas komunikacyjny samochodowy (*Road traffic noise*)
- hałas komunikacyjny szynowy (*Railway noise*)
- hałas lotniczy (*Aircraft noise*)
- hałas turbin wiatrowych (*Wind turbine noise*)
- hałas przemysłowy i bytowy (*Leisure noise*)

Zaznaczono, że nie każde źródło dźwięku jest odpowiedzialne za wywołanie wszystkich negatywnych skutków zdrowotnych. W przewodniku wskazano, że *HTW*, najważniejszy z punktu widzenia tej rozprawy, wywołuje dokuczliwość i prawdopodobieństwo przebudzeń nocnych. Te dwa negatywne skutki zdrowotne omówiono w następujących rozdziałach.

7.1. Dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych

Dokuczliwość definiuje się jako uczucie niezadowolenia, uciążliwości, niepokoju lub irytacji spowodowanych określonym dźwiękiem [96]. *HTW* jest uznawany za bardziej dokuczliwy od innych źródeł hałasu środowiskowego [58]. Rys. 7-1 przedstawia wykres *dose-response* (z ang. relację intensywności bodźca do reakcji) stosunku osób badanych, deklarujących skrajną dokuczliwość wywołaną hałasem %HA (ang. % *highly annoyed*) do poziomu hałasu pozostałych źródeł hałasu środowiskowego, m.in. hałasu drogowego, który jest najbardziej powszechny.



Rys. 7-1 Krzywe dose-response hałasu typowych źródeł środowiskowych (źródło ilustracji: [58])

Z Rys. 7-1 wykresu wynika, że *HTW* wywoła skrajną dokuczliwość u takiej samej liczby osób co np. hałas komunikacyjny przy dużo niższych wartościach równoważnego poziomu dźwięku. Za taki stan rzeczy może być odpowiedzialny fakt, że *HTW* jest łatwiej spostrzegany, niż inne źródła hałasu środowiskowego [60], [97]. *HTW* charakteryzuje się także modulacją amplitudową (opisaną w rozdz. 5.4), silnym udziałem składowych niskoczęstotliwościowych [98] i składowymi tonalnymi. Turbiny wiatrowe mogą również uchodzić za źródło dokuczliwe ze względu na fakt, że ich hałas jest długotrwały, słyszany nieprzerwanie w ciągu dnia i w nocy, wpływając na podniesienie poziomu tła w pobliżu farm wiatrowych [52].

Określenie „dokuczliwość” jest zazwyczaj wykorzystywane do określenia negatywnego wrażenia wywołanego oddziaływaniem hałasu, lecz jej prawdziwa definicja zależy od rozpatrywanego przypadku i często jest niejednoznaczne [99]. W jednej z pierwszych prac poświęconych zagadnieniu dokuczliwości [99] opisano 5 teorii na temat tego jakie czynniki leżą u podłoża powstawania dokuczliwości:

1) Dokuczliwość jako reakcja emocjonalna:

Teoria mówiąca o tym, że percepcja dźwięków nie zachodzi tylko na poziomie racjonalnym, ale także w wyniku reakcji emocjonalnej [100]. Zgodnie z nią dokuczliwość jest wynikiem afektywnego procesu wywołanego pojawieniem się bodźca akustycznego danego źródła, które wywołuje u nas strach, lęk lub dyskomfort. Bardziej współczesne badania sugerują również odwrotną zależność stwierdzającą, że stan emocjonalny jest istotny przy ocenie bodźców słuchowych [101].

2) Dokuczliwość wywołana zakłócaniem wykonywanych czynności:

Według tej teorii za dokuczliwe uznaje się źródła, którego hałas przeszkadza w wykonaniu jakiejś czynności, np. komunikacji z drugą osobą lub skupieniu się na pracy [102]. Wskazano,

że odrywanie od wykonywanej czynności, utrudnienie lub uniemożliwienie działania spowodowane hałasem istotnie wpływało na prawdopodobieństwa oceny źródła jako dokuczliwego.

3) Dokuczliwość wynikająca z nastawienia lub postawy:

Określanie źródła mianem dokuczliwego, zgodnie z tą teorią, wynika przede wszystkim z nastawienia do samego źródła [99]. Nastawienie albo postawa względem źródła hałasu może wynikać z bardzo wielu czynników takich jak uprzedzenia, osobiste doświadczenia, wpływ czynników społeczno-kulturowych, czynników ekonomicznych lub informacji podawanych w *mass-mediach*.

4) Dokuczliwość wynikająca z wiedzy:

Wg tej teorii ocena dokuczliwości hałasu jest dyktowana głównie wiedzą na temat źródła i skutków jego hałasu. Poziom ocenianego hałasu może nie korespondować z rzeczywistymi wartościami lub oceniane nagranie może pochodzić od innego źródła - i tak ocena hałasu będzie oparta na podanej informacji o źródle hałasu i wiedzy badanego na temat zagrożeń płynących z ekspozycji na jego hałas [99]. Można w takim razie wyciągnąć wniosek, że świadomość tego co jest źródłem hałasu ma decydujący wpływ na dokuczliwość. Niniejsza teoria wydaje się być związana z teoriami opisanymi w punkcie 1. i 3., które odnoszą się do afektywnej, podświadomej oceny dokuczliwości. Posiadana wiedza na temat źródła i generowanego hałasu (niezależnie czy jest zgodna z prawdą czy nie) kształtuje świadomość i nastawienie, które przekłada się na ocenę.

5) Dokuczliwość jako wynik racjonalnej decyzji:

Dokuczliwość jest rezultatem analizy obiektywnych czynników takich jak poziom hałasu w miejscu występowania źródła i z dala od niego (albo sprzed czasu jego funkcjonowania), bilans zysków i strat, jakie ponoszą osoby eksponowane na hałas i osobiste uwarunkowania (np. wrażliwość na hałas). Według [103] oceniając dokuczliwość hałasu badani racjonalnie analizują swoją indywidualną sytuację, bowiem średnie oceny dokuczliwości korespondują z poziomami ocenianego hałasu.

Analiza współczesnej literatury naukowej wskazuje na dwie teorie mogą stanowić wy tłumaczenie wysokiej dokuczliwości *HTW*. Są to:

- teoria 2: dokuczliwość *HTW* ma swoje podłoże w utrudnianiu wykonywania codziennych czynności,
- teoria 3: dokuczliwość *HTW* wynika z indywidualnego nastawienia do źródła hałasu.

Teorię 3 należy powiązać z czynnikami opisującymi teorie nr 1. i 4. czyli z emocjonalną reakcją na bodźce dźwiękowe i z zakresem posiadanych informacji (niekoniecznie adekwatnych) na temat źródła. Połączenie obu i postępowanie zgodnie z nimi są podstawą do kształtowania nastawienia do *TW* [104].

Nawiązując do teorii 2, zakłócenia lub przerywanie realizacji zadań należy rozumieć, jako spostrzeżenie (detekcję) bodźca akustycznego w trakcie wykonywania innych czynności [105].

Za detekcję dźwięków odpowiedzialny jest stosunek poziomu sygnału do szumu (SNR – *signal-to-noise ratio*) i gęstość widmowa mocy maskera [57]. Przy małej wartości stosunku SNR detekcja hałasu turbiny wiatrowej jest mało prawdopodobna. Poziom *HTW* na zewnątrz budynków niezwykle rzadko przekracza wartość poziomów 45 dBA [106], które wg rekomendacji WHO jest wartością nie powodującą negatywnych skutków zdrowotnych [79]. Wynikałoby z tego, że zamaskowanie sygnału turbiny wiatrowej (analizując wyłącznie stosunek poziomu sygnału do szumu) nie wymaga by masker (tła akustycznego) miał duży poziom dźwięku. Jeżeli detekcja hałasu turbin wiatrowych ma być przeprowadzona wewnątrz budynku, to po uwzględnieniu izolacyjności przegród zewnętrznych (w Polsce minimalna wymagana izolacyjność stolarki okiennej wynosi $R'_{A,2} = 30$ dB) hałas turbin wiatrowych będzie prawie niesłyszalny, a więc trudny do detekcji. Z prac [105], [107], [108] wynika jednak, że hałas turbin wiatrowych jest spostrzegany na tle dźwięków maskujących nawet przy bardzo niskim stosunku poziomu sygnału do szumu (w pracy [105] uzyskano wartość SNR równą -23 dB!). W pracy [13] udowodniono, że sam poziom *HTW* ma znikomą (<9%) wpływ na dokuczliwość. Wynika z tego, że określając progi detekcji hałasu turbin wiatrowych (i w konsekwencji wywołaną dokuczliwość) istotnymi czynnikami są: wiedza o źródle hałasu, charakterystyczny przebieg czasowy sygnału turbiny wiatrowej (za sprawą modulacji amplitudowej) i widmo dźwięku turbiny wiatrowej.

Nastawienie lub postawy będące podłożem dokuczliwości hałasu wg teorii 3 często nie mają związku z percepcją dźwięku [109]. Istotną rolę odgrywają wszelkie indywidualne czynniki: schorzenia (np. migreny, odczuwanie chronicznego bólu), wrażliwość na hałas, korzyści płynące z pracy turbin wiatrowych, czy ocena własnego zdrowia psychicznego [13], [110]. Na dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych wpływa także forma komunikacji między mieszkańcami a zarządzającymi farmami [111].

Grupą czynników pozaakustycznych, które istotnie wpływają na dokuczliwość *HTW* są bodźce wzrokowe: efekt migotania cienia (ang. *shadow flicker*), nocne błyski lampy ostrzegawczych, degradacja krajobrazu lub widok *TW* przez domowe okno [13]. Wg pracy [112] wskazano na najistotniejszych 5 typów dokuczliwości, które wpływają na wypadkową dokuczliwość *TW*. Wymienione typy są związane z: hałasem, efektem migotania cienia, błyskającymi nocą lampami, widocznością turbiny i drganiami. Dokuczliwość *HTW* stanowi mniejszą część czynników wpływających na ogólną ocenę turbin wiatrowych, większość czynników to czynniki wzrokowe. W innej pracy analizującej wieloczynnikową dokuczliwość *TW* stwierdzono, że wpływ dokuczliwości wywołanej hałasem na ogólny odbiór turbin wiatrowych jest wątpliwy [113].

7.1.1. Ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

Dokuczliwość hałasu definiuje się jako uczucie niezadowolenia, uciążliwości, niepokoju lub irytacji spowodowanych określonym dźwiękiem [96] jednak każde z tych określeń indywidualnie oznacza dla każdego człowieka co innego. Dodatkowo, wielkość dokuczliwości zostanie inaczej określona w zależności od okoliczności występowania hałasu – w czasie na odpoczynek lub skupienie hałas będzie bardziej dokuczliwy, niż gdy okoliczności tego nie wymagają. Dokuczliwość jest zatem miarą bardzo subiektywną.

Dokuczliwość jest negatywnym skutkiem zdrowotnym wywołanym hałasem, który przypisuje się większości źródeł hałasu środowiskowego [79]. Z tego względu przy ocenie dokuczliwości hałasu, utworzono uniwersalne skale do oceny dokuczliwości. Najbardziej rozpowszechnionymi i szeroko stosowanymi są ustandaryzowane skale [114]:

- 11-stopniowa skala liczbowa (skala między: 0 – wcale nie dokuczliwy; 10 – ekstremalnie dokuczliwy),
- 5 – stopniowa skala opisowa (skala ocen: skrajnie, bardzo, średnio, mało, wcale).

Powstanie ww. skal oceny jest przypisywane naukowcom na międzynarodowym kongresie ICBEN [115], dlatego potocznie nazywa się je właśnie od nazwy tej konferencji. Zaletą stosowania skali oceny ICBEN jest fakt, że została ona przetłumaczona na kilkanaście języków, umożliwiając porównanie wyników między badaczami z różnych krajów, co nie byłoby możliwe przy stosowaniu skal przygotowanych dla każdego języka osobno.

Oceniając dokuczliwość wg 11-stopniowej skali liczbowej badani otrzymują następującą instrukcję [116]:

Prezentuję Panu/Pani skalę liczbową od 0 do 10 dla wyrażenia opinii jak bardzo (źródło hałasu) hałas przeszkadza, irytuje lub dokucza, gdy jest Pan/Pani w domu. Jeśli nie dokucza Pani/Panu hałas wcale proszę wybrać 0, jeśli dokucza ekstremalnie proszę wybrać 10, jeśli dokucza w sposób „pomiędzy” proszę wybrać liczbę pomiędzy 0 i 10.

lub

Myśląc o ostatnich (..12 miesiącach lub podobnym okresie..) jaka liczba od 0 do 10 najlepiej opisuje jak bardzo przeszkadzający, irytujący, dokuczliwy był hałas pochodzący od (..nazwa źródła hałasu)?

Oceniając dokuczliwość wg 5-stopniowej skali opisowej [116]:

Myśląc o ostatnich (..12 miesiącach lub podobnym okresie..), kiedy był(a) Pan/Pani w domu, proszę odpowiedzieć, jak bardzo hałas z (..nazwa źródła..) przeszkadzał irytował, dokuczał Panu/Pani: skrajnie, bardzo, średnio, mało, wcale?

Sugerowany do oceny okres wynosi 12 miesięcy, jednak w badaniach laboratoryjnych ten czas często bywa znacznie krótszy i jest związany z długością prezentacji bodźców lub samego eksperymentu.

Przy ocenie dokuczliwości w populacji stosuje się również wskaźnik %HA, który wyznacza się na podstawie 5-stopniowej skali ICBEN [115]. Wartość wskaźnika %HA stanowi stosunek liczby osób, które, na 5-stopniowej opisowej skali dokuczliwości, oceniły hałas jako „skrajnie” albo „bardzo” dokuczliwy, do pozostałych badanych [114], [117]. Wskaźnik %HA jest pomocny w określaniu liczby osób narażonych na negatywnie skutki zdrowotne [79] lub w wyznaczaniu krzywych *dose-response* [66].

Ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych z wykorzystaniem skal ocen wg ICBEN jest metodą badania ankietowego. Taka forma posiada niestety wiele ograniczeń metodologicznych. Pierwszym z nich jest stronniczość odpowiedzi (ang. *bias*). Respondenci mogą udzielać odpowiedzi zgodnych z oczekiwaniami społecznymi lub wyolbrzymiać własne negatywne odczucia pod wpływem emocji [112]. Podobnie, osoby, które czerpały korzyści finansowe z funkcjonowania farmy wiatrowej (np. w wyniku dzierżawy działek, na której zlokalizowano *TW*), oceniały *HTW* jako mniej dokuczliwy. Stwierdzono, że ocena dokuczliwości i zgłaszane negatywne skutki zdrowotne mogą być kształtowane przez nastawienie wobec turbin, a nie przez faktyczny poziom hałasu. Drugim ograniczeniem jest selektywność uczestników (*self-selection bias*), która związana jest z faktem, że osoby bardziej dotknięte problemem hałasu częściej biorą udział w badaniach, co może prowadzić do nieobiektywnych wyników i zawyżania oceny dokuczliwości [113]. W badaniach ankietowych ocena narażenia na hałas (poziom, czas ekspozycji itp.) stanowi wyzwanie, ponieważ opiera się o deklaracje badanych lub wyniki obliczeń ze strategicznych map hałasu (rzadko z pomiarów przeprowadzonych w punkcie immisji) [118]. W badaniach ankietowych nie ma również pełnej kontroli nad wpływem pozaakustycznych czynników na ocenę dokuczliwości [110], [119].

7.1.2. Wpływ czynników wizualnych na dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych

Spośród wszystkich pozaakustycznych czynników wpływających na dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych, to czynniki wizualne wydają się mieć największe znaczenie [13]. Do najważniejszych zalicza się efekt migotania cienia, światło z lamp ostrzegawczych i degradację krajobrazu. Należy jednak zwrócić uwagę, że mówiąc o wpływie na dokuczliwość hałasu, nie ma pewności na ile wpływ dotyczy ściśle oceny hałasu, a na ile ogólnej dokuczliwości związanej funkcjonowaniem turbiny lub jej lokalizacją.

W pracy [120] badano wpływ czynników wzrokowych na ocenianą dokuczliwość w warunkach laboratoryjnych. Na podstawie uzyskanych stwierdzono, że widok turbiny wiatrowej ma wpływ na dokuczliwość hałasu, przy odpowiedniej kolejności bodźców audiowizualnych. W badaniach [121] zaobserwowano, że jeżeli turbiny wiatrowe są uznawane przez badanych za „brzydkie” albo niepasujące do scenerii, w której się znajdują, to istnieje duże prawdopodobieństwo tego, że ocena dokuczliwości będzie wyższa, niż sugerowałby to poziom *HTW*. Wyniki badań z pracy [122] sugerują, że hałas jest czynnikiem wpływającym na dokuczliwość bodźców wzrokowych w większym stopniu, niż bodźce wzrokowe na dokuczliwość hałasu, co potwierdzałoby wyniki [13] stanowiące, że hałas nie jest głównym czynnikiem związanym z dokuczliwością wywoływaną przez turbiny.

7.2. Przebudzenia nocne spowodowane hałasem turbin wiatrowych

Przebudzenia nocne są jednym z dwóch negatywnych skutków zdrowotnych, które mają być wywoływane hałasem turbin wiatrowych. Literatura w tym zakresie nie daje jednak jednoznacznej odpowiedzi czy rzeczywiście jest to stan faktyczny. W badaniu [123]

przeprowadzono eksperyment z użyciem polisomnografii i dzienników snu u 27 osób, z czego 15 z nich mieszkało w obszarze narażonym na hałas turbin wiatrowych. Mierzono m.in. opóźnienie zaśnięcia, liczbę przebudzeń, całkowity czas snu oraz jego efektywność. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w liczbie przebudzeń ani w jakości snu. W fińskich badaniach nad związkiem między poziomem hałasu wewnątrz budynków, a zgłaszaną subiektywnie jakością snu stwierdzono słabą, ale istotną statystycznie korelację między *HTW* a zaburzeniami snu [111].

W badaniu [124] również nie wykazano wpływu *HTW* na przebudzenia, ale zaobserwowano zależność z ilością spożywanej kofeiny i dokuczliwością wywołaną światłami ostrzegawczymi migającymi w nocy.

W niniejszej rozprawie i w trakcie przeprowadzonych badań nie podejmowano zagadnienia wpływu *HTW* na przebudzenia nocne.

8. Metody oceny hałasu turbin wiatrowych

Ocena hałasu turbin wiatrowych sprowadza się do porównania poziomów hałasu generowanego przez *TW* w punkcie emisji z wartościami dopuszczalnymi, określonymi w przepisach prawnych (patrz: rozdział 6). W Polsce dopuszczalne poziomy hałasu określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku [7]. Ocena *HTW* może odbywać się na różnych etapach realizacji inwestycji na farmach wiatrowych: na etapie projektowania lub po rozpoczęciu funkcjonowania *TW*.

Stosuje się dwie metody do wyznaczania poziomów *HTW* w punkcie emisji:

- pomiary akustyczne - w punktach zlokalizowanych na fasadach budynków chronionych lub na granicy terenów chronionych,
- obliczenia – w przygotowanym modelu komputerowym symuluje się rzeczywiste warunki funkcjonowania farmy wiatrowej. Obliczenia przeprowadza się opierając o informacje zgromadzone podczas pomiarów kalibracyjnych, założeń projektowych Inwestora lub baz danych (np. geoportal.gov.pl).

W Rozdz. 5.3 przedstawiono turbinę jako źródło hałasu silnie zależne od warunków meteorologicznych. Przy określaniu oddziaływania akustycznego turbin wiatrowych w trakcie pomiarów akustycznych należy rejestrować warunki meteorologiczne w czasie oceny hałasu. Najczęściej mierzy się prędkość i kierunek wiatru, temperaturę i wilgotność powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne. W przypadku obliczania długookresowych wskaźników hałasu (L_{DWN} , L_N) przyjmuje się średnioroczne warunki pogodowe.

8.1. Metody pomiarowe

Metody pomiarowe bazują na akustycznych pomiarach *in-situ*, czyli w miejscu występowania źródła. Do pomiarów terenowych hałasu turbin wiatrowych wykorzystuje się specjalistyczny sprzęt pomiarowy:

- mierniki poziomu dźwięku – zaawansowane cyfrowe mierniki poziomu dźwięku składające się z analizatora, przedwzmacniacza i kapsuły mikrofonowej; mierniki podlegają rutynowej kalibracji i okresowemu wzorcowaniu;
- systemy akwizycji danych – wielokanałowe rejestratory z wbudowanymi filtrami pasmowymi, analizatorami FFT, czy kalkulatorami parametrów psychoakustycznych. Przykład: system PULSE firmy Brüel&Kjaer lub SQuadriga II firmy Head Acoustics;
- rejestratory warunków meteorologicznych, stacje pogodowe;
- osłony przeciwwietrzne o zwiększonej średnicy, namioty pomiarowe albo płyty odbijające dźwięk do prowadzenia pomiarów na poziomie gruntu;
- statywy, kable przedłużające i inne urządzenia.

Metody pomiarowe są najbardziej dokładną formą oceny hałasu. Wyniki pomiarów uwzględniają wszystkie występujące w punkcie emisji zmienne wynikające nie tylko z warunków pogodowych, ale także ukształtowania i pokrycia terenu, wpływających na propagację fali

akustycznej (odbicie, tłumienie itp.). Często przywoływane metody pomiarowe opisano w normach:

- ETSU-R-97 [125] – jedna z pierwszych metod pomiaru i oceny hałasu turbin wiatrowych, w zaktualizowanej wersji dostępna w wydaniu Institute of Acoustics (IOA) z Wielkiej Brytanii [126]
- IEC 61400-11 [27] – metoda służąca do określenia parametrów emisji akustycznej pojedynczej *TW*. Pomiar wykonuje się w małej odległości od źródła na poziomie gruntu. Metoda określa sposób wyznaczania całkowitego poziomu mocy akustycznej L_{WA} oraz mocy akustycznej w postaci widma hałasu $L_{WA}^{(f)}$.

8.2. Metody obliczeniowe

Metody obliczeniowe to narzędzia, wykorzystujące zależności matematyczne i algorytmy wyprowadzone na podstawie przeprowadzonych przez ich twórców pomiarów. Metody obliczeniowe implementuje się w popularnych programach służących do modelowania hałasu takich jak SoudPlan czy CadnaA. Modele obliczeniowe pozwalają symulować rzeczywiste warunki propagacji hałasu i obliczyć poziom hałasu w dowolnej odległości od symulowanego źródła. Metody obliczeniowe umożliwiają ocenę hałasu w ujęciu dobowym lub długookresowym (opis znajduje wskaźników hałasu patrz: rozdz. 6.1).

Do najbardziej popularnych modeli obliczeniowych należą:

- ISO 9613-1 [127] – norma dotycząca obliczania propagacji dźwięku w otwartej przestrzeni i pochłaniania dźwięku przez powietrze. Norma zakłada stałe korzystne warunki propagacji hałasu, przez co obliczone poziomy w punktach immisji często prezentują najgorszy możliwy scenariusz. ISO 9613-1 nie nadaje się do obliczeń propagacji hałasu turbin wiatrowych ponieważ została opracowana dla źródeł zlokalizowanych na wysokości $h < 30\text{m}$.
- CNOSSOS-EU [128] – obowiązująca metodyka modelowania hałasu w Unii Europejskiej, wykorzystywana m.in. do obliczania map akustycznych. Metoda obejmuje metody obliczeniowe emisji i propagacji hałasu od dróg, kolei, lotnictwa i źródeł przemysłowych, w tym turbin wiatrowych. CNOSSOS-EU uwzględnia geometrię zabudowy, wielokrotne odbicia, ekranowanie, rodzaj gruntu oraz korektę meteorologiczną wyrażoną procentowym udziałem warunków sprzyjających propagacji w skali roku.
- Nord2000 [129] – metoda norweska wykorzystująca szczegółowe dane meteorologiczne do obliczania zasięgów propagacji hałasu. Metoda umożliwia szczegółowe modelowanie warunków pogodowych (m.in. kierunek i prędkość wiatru, gradient temperatury, refrakcja, turbulencje) oraz topografii i gruntów. Nord2000 często stosuje się do modelowania *HTW*, ponieważ pozwala obliczyć długookresowe rozkłady poziomów *HTW* w oparciu o wyznaczone klasy pogody. Metodyka Nord2000 została wykorzystana podczas przygotowania eksperymentów w niniejszej pracy.

8.2.1. Metoda Nord2000

Nord2000 [129] to metoda obliczeń równoważnego poziomu hałasu w oparciu o standardowe parametry źródła (poziom mocy L_{WA}) oraz drogi propagacji (współczynnik pochłaniania przez podłoże, warunki meteorologiczne, itp.). To co wyróżnia Nord2000 od pozostałych modeli to możliwość wprowadzenia do modelu bardzo szczegółowych danych pogodowych. W Rozdz. 5.3 zaznaczono, że warunki meteorologiczne odgrywają kluczową rolę w propagacji hałasu turbin wiatrowych. Model posiada gotową bibliotekę wcześniej określonych 25 klas pogodowych. W praktyce jednak wykorzystuje się tylko kilka z nich, które najlepiej oddają warunki pogodowe. Istnieje również możliwość utworzenia własnych klas pogodowych, adekwatnych do lokalizacji przedsięwzięcia, którego oddziaływanie jest liczone. Nord2000 umożliwia również obliczenia propagacji hałasu od źródeł zlokalizowanych wysoko nad ziemią takich jak *TW*.

Poziom hałasu w wybranym punkcie emisji, zgodnie z metodyką Nord2000, oblicza się wg wz. 4:

$$L_R = L_W + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r. \quad \text{wz. 4}$$

gdzie: L_R - poziom ciśnienia akustycznego w punkcie emisji,
 L_W - poziom mocy akustycznej źródła w pasmach tercjowych (25 – 10 000 Hz),
 ΔL_d - współczynnik kierunkowości źródła,
 ΔL_a - pochłanianie przez powietrze ,
 ΔL_t - wpływ odbicia i dyfrakcji,
 ΔL_s - wpływ stref rozpraszania (*scattering zones*), na drodze propagacji np. zabudowy, lasów itp.,
 ΔL_r - wpływ odbicia od przeszkód.

Ze względu na dużą dokładność i zgodność z rzeczywistymi pomiarami model Nord2000 wykorzystano w projekcie HETMAN [6] jako referencyjną metodykę obliczeniową.

9. Metody redukcji hałasu turbin wiatrowych

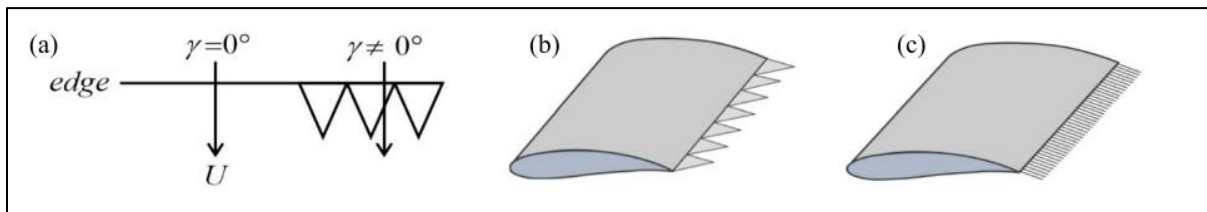
Redukcja hałasu turbin wiatrowych nie jest prostym zadaniem. Ze względu na położenie źródła na znacznej wysokości nie ma możliwości stosowania typowych metod ograniczających hałas takich jak np. ekrany akustyczne. Wśród wymienionych metod nie opisano podstawowych rozwiązań planistycznych i organizacyjnych. Należy do nich odsunięcie źródła hałasu (*TW* - na etapie planowania) od terenów chronionych akustycznie oraz dostosowanie warunków pracy *TW* (czasu pracy, prędkości obrotowej śmigła, produkcji energii elektrycznej) do standardów środowiskowych.

Metody wpływające na redukcje generowanego hałasu w niniejszej rozprawie określa się mianem twardych metod redukcji (*TMR*). *TMR* dzieli się metody redukcji hałasu mechanicznego i metody redukcji hałasu aerodynamicznego. Miękkie metody redukcji (*MMR*) zaprezentowane w tym rozdziale wprowadza się w celu ograniczenia oddziaływania *HTW* na subiektywną ocenę dokuczliwości hałasu.

9.1. „Twarde” metody redukcji hałasu aerodynamicznego

Hałas aerodynamiczny powstaje w wyniku turbulentnego opływu mas powietrza wokół łopaty lub wieży turbiny wiatrowej (patrz: rozdz. 5.1). Wywołuje to powstawanie lokalnych obszarów pod- i nadciśnienia, które generują hałas impulsowy. Hałas aerodynamiczny jest również związany z odrywaniem się, w wyniku turbulencji, warstwy przyściennej powietrza od powierzchni łopaty. Generuje to hałas szerokopasmowy dominujący w przedziale średnich częstotliwości.

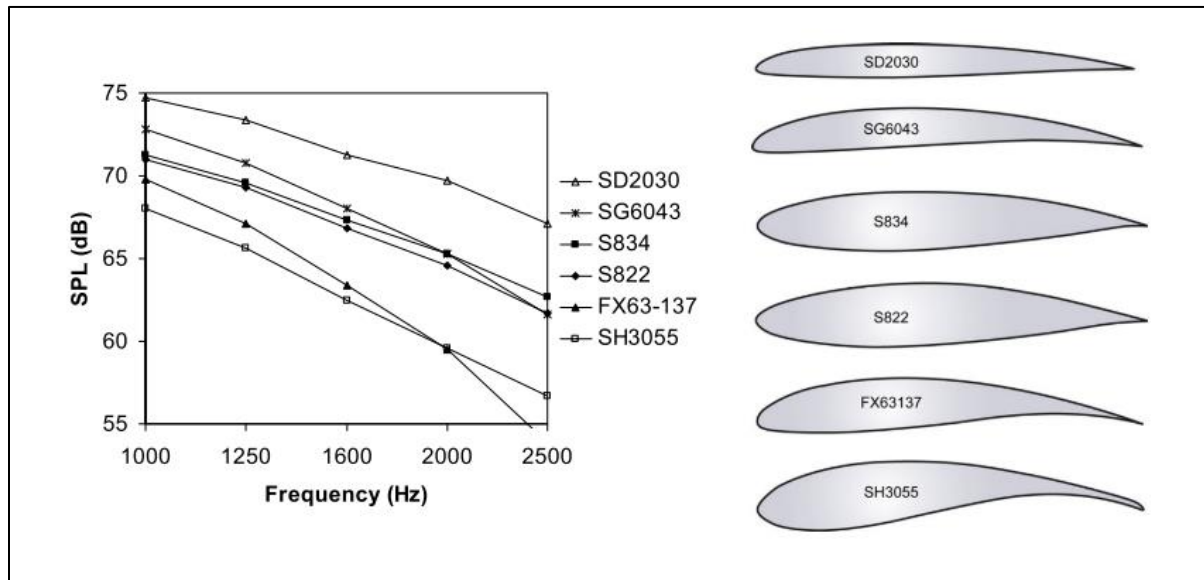
Sposobem na zredukowanie hałasu krawędzi splotu (ang. *trailing edge noise*) jest zapewnienie laminarnego przepływu powietrza tylnym brzegu łopaty i nie dopuszczenie do oderwania się warstwy przyściennej (*boundary layer*). W tym celu na krawędziach łopat stosuje się specjalne zakończenia przypominające ząbki albo pióra [130], które prezentuje Rys. 9-1 [131]. Dzięki zastosowaniu takich zakończeń możliwa jest redukcja poziomu mocy akustycznej L_{WA} równej 3.2 dB [132]. Na redukcję hałasu powstającego na krawędzi splotu ma wpływ odpowiednie dopasowanie kąta natarcia α np. dzięki inteligentnym systemom sterowania turbinami [32], [41], [44], [132].



Rys. 9-1 Przykład zastosowanie ząbkowania na tylnej krawędzi łopaty w celu redukcji hałasu krawędzi splotu (źródło ilustracji: [131])

Zastosowanie łopat o obłym profilu aerodynamicznym jest metodą redukcji hałasu krawędzi wiodącej (ang. *leading edge noise*) [133]. Efekt redukcji ukazuje Rys. 9-2, na którym przedstawiono widma hałasu generowanego przez łopaty o różnych profilach

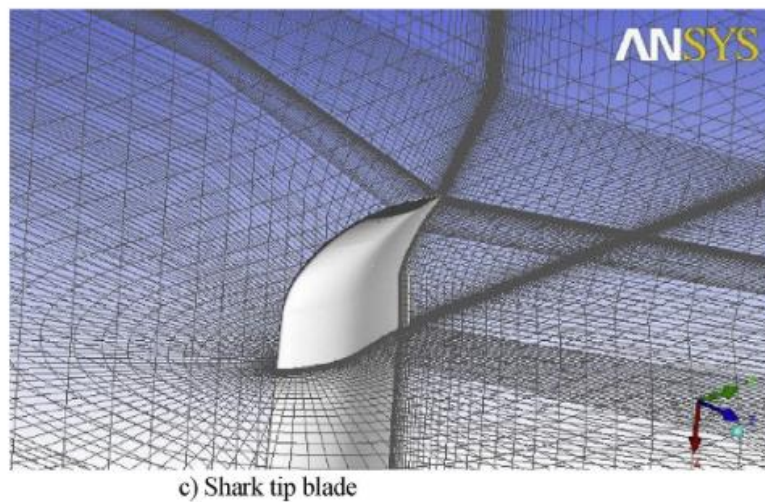
aerodynamicznych. Na podstawie rysunku można stwierdzić, że zaoblenie i zakrzywienie profilu aerodynamicznego skutkowało najmniejszymi poziomami *HTW*.



Rys. 9-2 Prezentacja różnych profili aerodynamicznych wpływających na zmniejszenie hałasu generowanego na krawędzi wiodącej (źródło ilustracji: [131]).

Kształt krawędzi wiodącej, podobnie jak w krawędź sptywu, jest poddawana zmianie kształtu w celu redukcji hałasu. Jednym z proponowanych rozwiązań jest „pofalowanie” przypominające sinusoidę wzdłuż całej długości krawędzi wiodącej [134].

Hałas końcówki łopaty (ang. *tip noise*) redukuje się poprzez stosowanie odpowiednich zakończeń lub zagięć, na końcu śmigła. Końcówki zapobiegają odrywaniu się warstwy przyściennej i powstawaniu obszarów lokalnego pod-/nadciśnienia w pobliżu końcówki łopaty. Ta metoda przyczynia się do redukcji hałasu tonalnego. Przykładem takiego zakończenia jest przypominająca rybią płetwę [135], przedstawiony na Rys. 9-3.



Rys. 9-3 Zakończenie końcówki łopaty w kształcie rybiej płetwy (źródło ilustracji: [135]).

Końcówka łopaty jest wtedy nieco krótsza i płasko zakończona. Zastosowanie specyficznych końcówek może skutkować redukcją poziomu mocy akustycznej nawet o 4 dB.

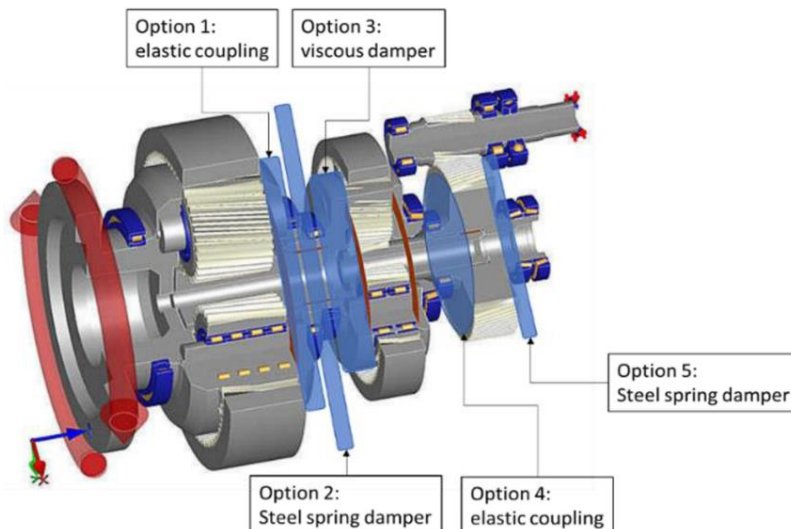
9.1.1. Redukcja hałasu generowanego na wieży

Hałas aerodynamiczny powstający w wyniku interakcji wiatru z wieżą *TW* powstaje w wyniku kompresji masy powietrza znajdującej się przed wieżą turbiny wiatrowej przez obracające się śmigło. Po przejściu łopaty koło wieży powietrze jest rozprężane co wywołuje impulsowy niskoczęstotliwościowy dźwięk, kojarzony z modulacją amplitudową [50]. Metodą redukcji hałasu generowanego w ten sposób jest zastosowanie wieży zbudowanej ze stalowej kratownicy, zamiast pełnych betonowych. Przykład wieży drabinkowej znajduje się na Rys. 4-3. Niestety ze względu na masę gondoli i urządzeń w niej pracujących, bardzo rzadko stosuje się tę metodę redukcji.

9.2. „Twarde” metody redukcji hałasu mechanicznego

Metody redukcji mechanicznego hałasu turbin wiatrowych są bardzo zbliżone do redukcji hałasu urządzeń przemysłowych. Kluczowym zabiegiem jest redukcja drgań i eliminacja materiałowych dróg przenoszenia hałasu stosując wibroizolatory. Emisja hałasu do środowiska jest zmniejszana poprzez zwiększenie izolacyjności zewnętrznych ścian gondoli [38].

Urządzenie, będące dominującym źródłem hałasu w gondoli jest przekładnia (ang. *gearbox*). Metodą redukcji hałasu generowanego przez przekładnię jest stosowanie odpowiednich kół zębatach o zębatach zmniejszających tarcie. Wg [38] koła zębata o zębatach śrubowych (ang. *helical*) są o ok. 1dB cichsze od kół o prostych zębatach (ang. *spur*).



Rys. 9-4 Redukcja drgań przekładni dzięki wykorzystaniu elastycznych sprzęgaczy i stalowych sprężyn tłumiących.
Źródło ilustracji: [136]

W przekładni można również zastosować elastyczne sprzęgacze (zaprezentowane na Rys. 9-4) i stalowe tłumiki w postaci sprężyn izolujące pozostałe elementy konstrukcji od drgań [136].

Rezygnacja ze stosowania przekładni również stanowi pewną formę redukcji hałasu. Obecnie produkowane turbiny wiatrowe coraz częściej mają piastę śmigła połączoną bezpośrednio do generatora, co znacząco wpływa na zmniejszenie generowanego hałasu.

9.3. „Miękkie” metody redukcji hałasu turbin wiatrowych

MMR analizowane w kontekście celów badawczych niniejszej rozprawy dotyczą zmniejszenia dokuczliwości *HTW* oraz widoczności *TW*. Dokuczliwość jest związana z percepcją *HTW* - jeżeli badany nie dostrzega sygnału *TW* to nie wywoła u niego wrażenia dokuczliwości. Maskowanie sygnału akustycznego innym dźwiękiem (maskerem) wpływa na podniesienie jego progu detekcji. W przypadku *TW*, jeżeli generowany przez nią hałas zostanie zamaskowany to zmniejszeniu ulegnie ocena dokuczliwości.

Redukcja dokuczliwości spowodowanej widokiem *TW* polega na zastąpieniu źródła hałasu innym, akceptowanym obiektem. Źródło, którego nie widać, lub widać w mniejszym stopniu nie przykuwa uwagi co utrudnia koncentrację na generowanym przez nie hałasie. W ten sposób zastąpienie źródła hałas stanowi wieloczynnikową metodę podniesienia progu spostrzegania sygnału akustycznego. Metoda jest analogiczna do maskowania hałasu innym źródłem, ale w zakresie zmysłu wzroku.

9.3.1. Maskowanie hałasu turbin wiatrowych

Maskowanie hałasu to proces, w wyniku którego próg słyszenia jednego dźwięku (sygnału) podnosi się na skutek obecności innego dźwięku (maskera) [57]. W badaniach laboratoryjnych maskerami są najczęściej szумы. Najistotniejsze z nich to [57]:

- szum biały: szerokopasmowy sygnał zawierający wszystkie składowe widma słyszalnego i stałą obwiednię widmową lub inaczej stałą gęstość widmową sygnału. Oznacza to, że w każdym paśmie szumu białego jest taka sama moc,
- szum różowy: szerokopasmowy zawierający wszystkie składowe widma słyszalnego i obwiednię widma o spadku o 3dB na oktawę,
- szum mowopodobny (ang. *babble noise*): szum utworzony z nalożenia na siebie wielu sygnałów mowy w celu odwzorowania średniego widma mowy. Szумы mowopodobne tworzy się osobno dla poszczególnych języków. Wykorzystuje się je w badaniach nad zrozumiałością mowy w szumie.

Gdy w wyniku maskowania sygnał przestaje być zupełnie słyszalny mówi się o maskowaniu całkowitym (ang. *total masking*). Maskowanie częściowe (ang. *partial masking*) zachodzi, gdy sygnał wciąż jest słyszalny, ale zmniejsza się jego głośność [57].

Maskowanie wykorzystuje się w badaniach procesu detekcji sygnału na tle szumu. Miarą progu detekcji jest stosunek poziomu sygnału do szumu (ang. *signal-to-noise ratio* - SNR), z jednostką w dB, definiowanego jako (wz. 5):

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{signal}}{p_{noise}} \right) [dB]$$

wz. 5

gdzie: p_{signal} – ciśnienie akustyczne sygnałów całym paśmie
 p_{noise} – ciśnienie akustyczne maskera w całym paśmie

Maskowanie można podzielić na dwa rodzaje:

- maskowanie energetyczne – wynika z nakładania się pobudzeń sygnału i maskera w uchu wewnętrznym [137]. Skuteczność maskowania energetycznego wynika ze stosunku SNR (wz. 5). Za skuteczność maskowania energetycznego odpowiedzialna jest głównie energia maskera w poszczególnych pasmach częstotliwości. Gdy SNR dla danego pasma spadnie poniżej stałej detekcyjnej, sygnał staje się niestyszalny,
- maskowanie informacyjne – jest związane z przetwarzaniem dźwięków na wyższych poziomach drogi słuchowej. Wynika przede wszystkim z wysokiego podobieństwa sygnału i maskera, oraz alokacja uwagi. Maskowanie informacyjne jest szczególnie istotne przy maskowaniu sygnałów zmieniających się w czasie, takich jak mowa lub sygnały zmodulowane amplitudowo. Na skuteczność maskowania informacyjnego wpływa podobieństwo sygnału i maskera i takie zjawiska jak „*listening in the dips*” (z ang. słuchanie w dołkach) oraz CMR (ang. *comodulation masking release*).

CMR to efekt odmaskowania, czyli obniżenia progu detekcji sygnału na tle maskera, których obwiednie amplitudy, w kolejnych pasmach częstotliwości, są do siebie zbliżone [138], [139]. Obniżenie progu nazywa się *comodulation masking release* (CMR) i bywa ilościowo definiowane jako różnica progów między warunkiem „obwiednie skorelowane” a „nieskorelowane” .

By masker można było uznać skuteczny to jego gęstość widmowa musi być zbliżona do gęstości widmowej sygnału, który maskuje. Z punktu widzenia maskowania informacyjnego masker powinien być zmodulowany amplitudowo, ale by uniknąć zjawiska komodulacji powinien cechować się inną częstotliwością modulacji. W przypadku hałasu turbin wiatrowych, naturalnie występującym maskerem o podobnej gęstości widmowej sygnału i zmiennej obwiedni spowodowanej przejazdami pojedynczych pojazdów jest hałas drogowy [105], [107], [108].

W prowadzonych badaniach środowiskowych zaobserwowano, że maskowanie hałasu przemysłowego naturalnymi dźwiękami (szumem wody) prowadzi do zmniejszenia dokuczliwości [140]. Wykorzystywanie naturalnych dźwięków do kształtowania tzw. „pejzażu akustycznego” jest domeną dziedziny akustyki określanej jako *soundscape* [141], [142]. Niestety badania [9], [10] dowiodły, że *HTW* nie jest skutecznie maskowany przez naturalnie występujące dźwięki takie jak szum morza lub wiatru.

W pracach [11], [12], [105] podjęto próby maskowania *HTW* przy pomocy HD. Badani nie byli w stanie rozróżnić *HTW* na tle maskera przy SNR wynoszącym -20 dB. Maskerem był hałas lokalnej drogi, z którego można było rozróżnić pojedyncze przejazdy samochodów. Warunki prezentacji *HTW* odzwierciedlały odśłuch wewnątrz budynku.

9.3.2. Zastąpienie widoku turbiny wiatrowej

Widoczność *TW* stanowi istotny czynnik wpływający na dokuczliwość *HTW*. Osoby, które widzą *TW* w miejscu swojego zamieszkania, częściej rozpoznają *HTW* i deklarują wyższą dokuczliwość od innych badanych przy tym samym poziomie ekspozycji akustycznej. To zjawisko jest częściowo spowodowane przez nastawienie do *TW* i ich ocenę estetyczną. Wraz z bardziej negatywną oceną wyglądu, rośnie prawdopodobieństwo ocenienia *HTW* jako bardziej dokuczliwego [105], [121], [143], [144]. Oznacza to, że widok *TW* ułatwia identyfikację jej hałasu, zwiększa szanse na jej detekcję i wpływa na bardziej negatywne oceny dokuczliwości.

Prace niezwiązane z dokuczliwością *HTW* sugerują, że pozytywny kontekst wizualny (np. prezentacja różnorodnej zieleni w polu widzenia) może obniżać deklarowaną dokuczliwość hałasu drogowego [145]. Z kolei badania eksperymentalne wskazują, że zdolność do utrzymania uwagi i czynniki indywidualne przy ocenie dokuczliwość *HTW* są powiązane z widocznością źródła hałasu i charakterem jego prezentacji. U osób o trudnościach w skupieniu, widoczność źródła wpływała na ocenianie hałasu jako bardziej dokuczliwego [146], [147], [148].

III Hipotezy badawcze

10. Hipoteza 1

Hipoteza 1 odnosi się do pierwszego szczegółowego celu badawczego jakim jest określenie warunków maskowania hałasu turbin wiatrowych, dla których zmieniają się progi detekcji tego hałasu. Opierając się na Rozdz. 9.3.1 masker, którym powinno się maskować hałas turbin wiatrowych powinien posiadać zbliżone widmo dźwięku do hałasu turbin wiatrowych, mieć podobny przebieg czasowy hałasu do przebiegu hałasu *TW* i być zlokalizowany w pobliżu miejsc występowania turbin.

Zgodnie z przeprowadzonym przeglądem literatury przykładem takiego maskera jest hałas drogowy (*HD*). Cechuje się podobnym widmem hałasu, z gęstością energii dominującą w średnich i niskich pasmach częstotliwości. Źródła *HD* (np. autostrady) występują na otwartej przestrzeni, niekiedy w pobliżu samych farm wiatrowych. Przebiegi czasowe związane z przejazdami samochodów cechują się narastaniem i zmniejszaniem się poziomu dźwięku, co dobrze koresponduje z modulowanym przebiegiem czasowym *HTW*. W oparciu o powyższe przyjęto hipotezę **H1: Hałas autostrady skutecznie maskuje hałas turbin wiatrowych.**

Eksperyment przygotowany i przeprowadzony do weryfikacji tej hipotezy posiadał dwie zmienne niezależne: odległość od słuchacza w której prezentowano sygnał turbiny wiatrowej oraz odległość w jakiej prezentowano masker – hałas autostrady. Zmiana odległości w jakiej prezentowano bodźce sygnału i maskera wpływała nie tylko na poziom dźwięków, ale również na kształt widma hałasu obu rodzajów bodźców. Zmienną zależną był próg różnicowania dokuczliwości turbiny wiatrowej na tle hałasu autostrady wyrażony odległością między wirtualnym położeniem *TW* a punktem obserwacji.

Alternatywnym, naturalnie występującym maskerem w pobliżu farm wiatrowych jest również szum wiatru, który ma również zbliżone widmo do widma *HTW* i jest obecny zawsze wtedy, gdy pracuje *TW*. W związku z tym przygotowano eksperyment II, w którym rolę maskera wraz z *HD* pełnił hałas wiatru.

11. Hipoteza 2

Hipoteza 2 była związana z drugim szczegółowym celem badawczym – określeniem warunków zastąpienia źródła hałasu w jakich ocena dokuczliwości hałasu ulega poprawie.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury (patrz: Rozdz. 9.3.2) stwierdzono, że zastąpienie źródła dźwięku odpowiednim obiektem wpływa na obniżenie oceny dokuczliwości hałasu. Opisany eksperyment miał na celu określić wpływ częściowego zastąpienia *TW* na ocenę dokuczliwości hałasu. *TW* jako obiekty bardzo wysokie, górują nad innymi obiektami i z tego względu niekiedy niemożliwe jest całkowite zastąpienie widoku źródła.

Obiekt zastępujący turbinę wiatrową powinien mieć naturalne pochodzenie – być elementem krajobrazu naturalnego, rośliną lub ukształtowaniem terenu. Tego rodzaju obiektem są drzewa, które mogą naturalnie występować w sąsiedztwie turbin wiatrowych. Przez swoją wysokość mają szansę zasłonić najbardziej dostrzegalny element turbiny wiatrowej, czyli śmigło. Drzewa poruszając się na wietrze mogą również odwrócić uwagę od obracających się łopat. Do zalet wykorzystania drzew jako „wizualnego maskera” należy dodać: powszechną obecność, pozytywne skojarzenia związane z obcowaniem z naturą, oraz generowanie szumu, który może potencjalnie maskować hałas o bardzo małym poziomie. Realne zastosowanie takiego rozwiązania redukującego hałas wymagałoby przeprowadzenia nasadzeń.

W oparciu o powyższe doniesienia sformułowano hipotezę **H2: Czynniki wzrokowe wpływają na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych.**

W eksperymencie kontrolowano dwie zmienne niezależne: stopień zastąpienia turbiny wiatrowej i odległość w jakiej audiowizualne bodźce turbiny wiatrowej były prezentowane. Zmiana odległości prezentacji bodźca audiowizualnego wpływała na poziom i wielkość prezentowanej turbiny wiatrowej. Zmienną niezależną była ocena dokuczliwości hałasu turbiny wiatrowej.

Hipotezą pomocniczą w tym etapie badań było stwierdzenie, że prezentacja bodźców audiowizualnych w wirtualnej rzeczywistości (VR – *virtual reality*) lepiej oddaje okoliczności, w których zachodzi percepcja dźwięków turbiny wiatrowej. W przeanalizowanych badaniach psychoakustycznych wykorzystane bodźce audiowizualne były prezentowane na rzutniku lub płaskim ekranie, a dźwięk był prezentowany z głośników. W celu zwiększenia realizmu prezentowanych bodźców eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem gogli VR i prezentacji przestrzennego dźwięku. Jest to metoda jak dotąd rzadko stosowana w badaniach psychoakustycznych, do tej pory większość badań prezentujących bodźce wzrokowe wykorzystywało telewizory bądź ekrany rzutników.

12. Hipoteza 3

HTW jest uznawany za wyjątkowo dokuczliwy, bardziej niż hałas innych źródeł hałasu środowiskowego [58], np. hałasu drogowego (*HD*). Literatura wskazuje, że na dokuczliwość *HTW* w głównej mierze wpływają czynniki pozaakustyczne (patrz: rozdział 7.1). Jednocześnie temat *TW* w Polsce (i w wielu częściach świata) wywołuje spore kontrowersje (patrz: rozdział 1) co wpływa na indywidualne nastawienie badanych do tego źródła hałasu.

W publikacjach naukowych opisujących dokuczliwość turbin wiatrowych wskazuje się, że komponent akustyczny nie jest czynnikiem dominującym (patrz: rozdz. 7.1) przy określaniu ogólnej dokuczliwości. Większe znaczenie w ogólnej ocenie *TW* ma indywidualne nastawienie i czynniki wzrokowe. Te same czynniki istotnie wpływają na ocenę dokuczliwości hałasu. Istnieje zatem prawdopodobieństwo, że po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych hałas turbin wiatrowych mógłby być oceniony w inny sposób, zbliżony do dokuczliwości pozostałych źródeł hałasu środowiskowego.

Badania ankietowe powszechnie stosowane do oceny dokuczliwości, nie pozwalają wykluczyć wpływu czynników pozaakustycznych w trakcie oceny. Badani udzielają świadomej odpowiedzi na temat źródła, które rozpoznają i co do którego mają wyrobione indywidualne zdanie lub skojarzenia. W Rozdz. 7.1.1 wskazano prace, wg których badanie dokuczliwości za pomocą ankiet (niezależnie czy w formie papierowej czy w rzeczywistości wirtualnej) nigdy nie pozwoli wyeliminować wszystkich czynników pozaakustycznych. Ocena dokuczliwości w formie pytań zawsze obciążona jest tendencyjnością osoby badanej.

Sposobem na dokładną ocenę dokuczliwości *HTW* jest zastosowanie metody eliminującej czynniki pozaakustyczne z oceny dokuczliwości. Rzetelna ocena dokuczliwości *HTW* jest również konieczna do określenia rzeczywistej skuteczności *MMR*, które opracowywano w niniejszej rozprawie. W wyniku powyższego rozumowania sformułowano hipotezę **H3: Precyzyjna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych.**

Odpowiednią formą eksperymentu weryfikującego powyższą hipotezę jest badanie wpływu *HTW* na wyniki testów zdolności poznawczych. Dokuczliwość hałasu wg [102] jest związana z utrudnianiem wykonywania codziennych czynności, w tym procesów myślowych. W trakcie rozwiązywania testów zdolności poznawczych badani nie mają możliwości przeniesienia swojego nastawienia do energetyki wiatrowej na wykonywane zadanie.

Jeżeli hałas turbin wiatrowych będzie miał negatywny wpływ na wyniki testów kognitywnych, będzie to oznaczało, że powoduje dokuczliwość. Przeprowadzenie tego eksperymentu z wykorzystaniem bodźców pochodzących od pozostałych źródeł hałasu środowiskowego pozwoli określić relację dokuczliwości *HTW* względem pozostałych źródeł bez wpływu czynników pozaakustycznych.

IV Metodyka badań i aparatura

W ramach niniejszej pracy zaprojektowano 4 eksperymenty, które podzielono na 3 etapy. Celem każdego etapu była weryfikacja jednej z trzech hipotez (patrz: Sekcja III). Nazwy i podział eksperymentów na etapy oraz przypisanie ich do hipotez badawczych przedstawia Tab. 12-1.

Tab. 12-1 Zestawienie przeprowadzonych eksperymentów i przypisanie ich do etapów pracy badawczej oraz rozdziału w niniejszej rozprawie

Hipoteza badawcza	Etap prowadzonych badań	Tytuł eksperymentu
H1: Hałas autostrady skutecznie maskuje hałas turbin wiatrowych	I	Eksperyment 1. Wpływ hałasu autostrady na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych
		Eksperyment 2. Wpływ hałasu autostrady i wiatru na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych
H2: Czynniki wzrokowe wpływają na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych	II	Eksperyment 3. Udział czynników wzrokowych w ocenie dokuczliwości hałasu turbiny wiatrowej
H3: Precyzyjna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych	III	Eksperyment 4. Ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych w warunkach kontrolowanych

W kolejnym rozdziale opisano przeprowadzone pomiary terenowe, podczas których pozyskano nagrania bodźców akustycznych do wszystkich eksperymentów. W rozdziałach 14, 15 i 16 opisano proces tworzenia i przeprowadzenia eksperymentów.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawiono w sekcji V. Obliczenia związane z analizą statystyczną przeprowadzono w programie JASP v. 0.95.1 [149]. Analizę wymaganej liczby osób badanych w eksperymentach przeprowadzono w programie G*Power [150].

13. Pomiary terenowe i nagrania bodźców

Pomiary akustyczne przeprowadzono osobno dla każdego źródła dźwięku wykorzystanego w eksperymentach. Były nimi turbiny wiatrowe, autostrada oraz nagrania hałasu wiatru w kontrolowanych warunkach.

13.1. Pomiary hałasu turbin wiatrowych

Pomiary hałasu turbin wiatrowych przeprowadzono na dwóch różnych farmach wiatrowych. Pierwsza z nich jest zlokalizowana jest w województwie łódzkim, druga znajduje się w województwie lubuskim. Ze względu na obowiązujące umowy poufności w pracy nie zamieszczono lokalizacji farm wiatrowych. Nagrania zarejestrowane na pierwszej farmie wykorzystano do eksperymentów Etapu I, nagrania z drugiej farmy wykorzystano przy tworzeniu eksperymentów Etapu II i Etapu III.

Pomiary akustyczne *HTW* były realizowane przy okazji pomiarów przeprowadzonych w ramach projektu HETMAN [6].

13.1.1. Lokalizacja 1

Pierwsze pomiary akustyczne na farmie wiatrowej przeprowadzono wiosną 2021 roku. W trakcie pomiarów działała wyłącznie jedna turbina wiatrowa, od której mierzono hałas. Było to możliwe dzięki zdalnemu serwowaniu pracą turbin przez Zarządzającego farmą. W ten sposób zarejestrowano nagrania i zmierzono poziom hałasu pojedynczej *TW* bez wpływu innych urządzeń na farmie. Zarejestrowany hałas pojedynczej *TW* mógł być łatwo przeliczony gdyby zaszła konieczność prezentacji w eksperymentach większej liczby *TW*. Zmierzonym urządzeniem była turbina Vestas V90 o mocy 2 MW. Wysokość wieży wraz z gondolą wynosiła 105 m, średnica śmigła – 90 m. Maksymalna wysokość była równa 150 m.

Poziomy *HTW* mierzono w kilku odległościach od turbiny i na dwóch osiach względem kierunku wiatru: po stronie zawietrznej *TW* i prostopadle do niej. Na potrzeby eksperymentów wykorzystano wyniki zarejestrowane po stronie zawietrznej w odległości 150 m na wysokości 1.5 m.n.p.t. Po analizie wyników pomiarów stwierdzono, że wartości poziomego *HTW* są największe po stronie zawietrznej. Rys. 13-1 prezentuje punkt pomiarowy po stronie zawietrznej badanej turbiny wiatrowej.



Rys. 13-1 Punkt pomiarowy podczas pomiarów hałasu turbiny wiatrowej w lokalizacji 1.

Farma wiatrowa była zlokalizowana pośród zaoranych pól uprawnych. Otaczający teren był płaski. W pobliżu punktów ustawionych prostopadle do średniego kierunku wiatru przebiegała asfaltowa droga lokalna. Pomiarów prowadzono od godzin popołudniowych do późnych godzin nocnych.

13.1.2. Lokalizacja 2

Pomiary akustyczne na drugiej farmie wiatrowej przeprowadzono wiosną 2023 r. Zarządzający farmą również umożliwił kontrolę nad pracą elektrowni, dlatego podczas pomiarów działała tylko jedna *TW*. Ponownie, punkty pomiarowe były zlokalizowane w kilku odległościach od turbiny wiatrowej, na dwóch osiach: jednej równoległej do kierunku wiatru; drugiej prostopadłej do niego. Punkt pomiarowy, który analizowano, zlokalizowano po zawietrznej stronie *TW*, w odległości 250 m od źródła, na wysokości 1.5 m.n.p.t. Położenie wszystkich punktów pomiarowych oraz średni kierunek wiatru przedstawia Rys. 13-2



Rys. 13-2 Punkt pomiarowy podczas pomiarów hałasu turbiny wiatrowej w lokalizacji 2.

Badaną *TW* była Vestas V90 o mocy 2 MW, której wysokość od podstawy do szczytu gondoli wynosiła 105 m, zaś średnica śmigła – 90 m. Maksymalna wysokość była równa 150 m.

Teren wokół badanej turbiny wiatrowej był nieregularny, lekko pagórkowaty, bez przeszkód terenowych (takich jak głązy, drzewa, roślinność itp.), natomiast na drodze propagacji *HTW* był płaski. Teren pokryty był niską trawą oraz niską roślinnością uprawną. Pomiarów były prowadzone od godzin popołudniowych do późnych godzin nocnych.

13.1.3. Aparatura pomiarowa

Podczas pomiarów poziomu hałasu wykorzystano mierniki firmy Svantek typ: SVAN 979. Stosowano standardowe osłony przeciwwietrzne o średnicy 7 cm. Podstawowe ustawienia mierników przedstawiono w Tab. 13-1. Miernik poziomu dźwięku SVAN 979 w trakcie pomiarów HTW przedstawia Rys. 13-3.

Tab. 13-1 Podstawowe ustawienia mierników wykorzystywanych podczas pomiarów akustycznych hałasu turbin wiatrowych.

Parametr	Ustawienie
Włączone funkcje	Miernik poziomu dźwięku Filtry tercjowe
Profile pomiarowe	A (Fast) Z (Fast)
Zapisywane wartości	L_{Aeq} L_{Zeq}
Krok loggera	50 ms
Dynamika mikrofonu	22 – 120 dB
Zakres częstotliwości	0.8 Hz – 20000 Hz
Zapis *.wav	Tak ($f_s=48$ kHz, filtr HP)

Rejestrację nagrań audio HTW realizowano przy pomocy mikrofonu ambisonicznego 4 rzędu firmy RODE, typ: NTSF1 połączonego z systemem akwizycji danych firmy Artemis, typ: SQuadriga II. Mikrofon podczas rejestracji był umieszczony na wysokości 1.5 m.n.p.t. Zestaw pomiarowy do rejestracji HTW przedstawia Rys. 13-3



Rys. 13-3 Po lewej: mikrofon ambisoniczny 4. rzędu RODE NTSF1 z systemem akwizycji Artemis SQuadriga II, ustawione na statywie na wysokości 1.5 m.n.p.t.; po prawej: miernik poziomu dźwięku SVAN 979, mikrofony umieszczono na wysokości 4 m i 1.5 m n.p.t.

W trakcie pomiarów rejestrowano również warunki pogodowe na dwóch wysokościach:

- 4 m.n.p.t. – stacja Davis Instruments, typ: VANTAGE PRO2
- 11 m.n.p.t. – stacja Hongyuv, typ: HY-WDC6E

Warunki meteorologiczne na wysokości gondoli przedstawiały dane pobrane z mierników na szczycie wieży badanej turbiny wiatrowej (105 m.n.p.t.). Istotnymi z punktu widzenia dalszych obliczeń i analizy parametrami meteorologicznymi były:

- prędkość wiatru
- kierunek wiatru
- temperatura
- wilgotności powietrza
- ciśnienie atmosferyczne

13.1.4. Wyniki pomiarów

W tabeli Tab. 13-2 przedstawiono wartości podstawowych parametrów mierzonych podczas pomiarów akustycznych. Do dalszej obróbki wybrano nagrania niezakłócone i pozbawione zakłóceń wywołanych wiatrem.

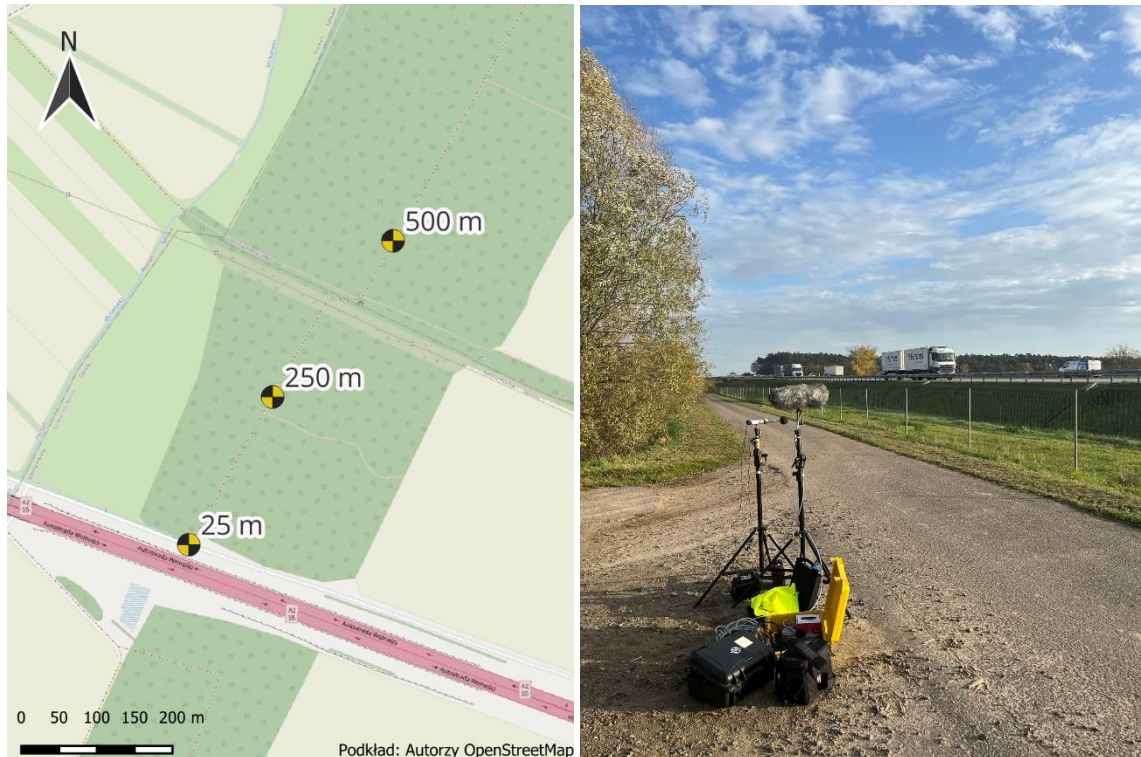
Tab. 13-2 Wyniki pomiarów HTW.

Lokalizacja	Równoważny poziom hałasu L_{Aeq} fragmentu wybranego do dalszej obróbki [dBA]	Czas trwania nagrania [s]	Średnia prędkość wiatru [m/s ²]		Wilgotność powietrza [%]	Temperatura [°C]
			(wys. 10 m.n.p.t.)	(wys. 105 m.n.p.t.)		
1	49.1	600	4.0	7.0	58.0	6.0
2	43.2		4.3	8.9	55.0	15.2

13.2. Pomiary hałasu drogowego

Nagrania hałasu drogowego (HD) przeprowadzono jesienią 2022 roku przy autostradzie A2 w okolicy Poznania, na odcinku: węzeł Poznań Krzesiny – Poznań Wschód, między 173 i 174 kilometrem (Rys. 13-4). Natężenie ruchu samochodowego było znaczne ze względu na porę powrotów z pracy / wyjazdów weekendowych, tj. piątek, w godzinach 15:00 – 17:00. Średnioroczne natężenie ruchu dla tego odcinka, mierzone w latach 2020/2021, wynosi 50 124 pojazdy na dobę [151].

Pomiary przeprowadzono na prostym odcinku drogi gruntowej biegnącej prostopadle do autostrady A2 w odległościach 25 m, 250 m i 500 m od najbliższej osi jezdni. Punkty pomiarowe zlokalizowano na wysokości 1.5 m.n.p.t. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawia Rys. 13-4.



Rys. 13-4 Lokalizacja punktów pomiarowych podczas pomiarów hałasu od autostrady A2.

Do pomiarów poziomów hałasu wykorzystano miernik poziomu dźwięku firmy Svantek, typ: SVAN 979 z mikrofonem umieszczonym na wysokości 1.5 m.n.p.t. Do rejestracji sygnałów audio, podobnie jak przy pomiarach *HTW* (patrz: rozdział 13.1), wykorzystano mikrofon ambisoniczny 4 rzędu firmy RODE, typ NTSF1 połączony z systemem akwizycji firmy Artemis, typ SQuadriga II. Wysokości mikrofonu nad ziemią również wynosiła 1.5 m. Warunki meteorologiczne rejestrowano na wysokości 4 m.n.p.t. stacją pogodową Davis Instruments, typ VANTAGE PRO2. Wyniki pomiarów *HD* przedstawiono w Tab. 13-3

Tab. 13-3 Wyniki pomiarów *HD*.

Odległość od osi jezdni [m]	Równoważny poziom hałasu L_{Aeq} fragmentu wybranego do dalszej obróbki [dBA]	Czas trwania nagrania [min]	Średnia prędkość wiatru [m/s^2] na 4 m.n.p.t.	Wilgotność powietrza [%]	Temperatura [$^{\circ}C$]
25	79.7	10	0.7	46	11.3
250	70.3				
500	68.2				

Droga gruntowa wzdłuż której zlokalizowano punkty pomiarowe przebiegała w otoczeniu zaoranych pól uprawnych. Dzień pomiarów przypadła po długotrwałych opadach, dlatego ziemia była wilgotna, z licznymi kałużami.

13.3. Pomiary hałasu wiatru

Nagrania hałasu wiatru przeprowadzono w komorze bezdechowej Instytutu Techniki Ciepłej w Łodzi. Komora jest wyposażona w tunel aerodynamiczny, który umożliwia prowadzenie pomiarów akustycznych w strumieniu powietrza stałej prędkości przepływu. Miejsce pomiarów przedstawia Rys. 13-5. Podczas pomiarów i nagrań rejestrowano hałas przy prędkości wiatru równej: 3, 4, 5, 6, 8, 10 i 12 m/s.



Rys. 13-5 Tunel aerodynamiczny w komorze bezdechowej Instytutu Techniki Ciepłej w Łodzi

Rejestrowany przez ludzi hałas wiatru jest spowodowany turbulentnym przepływem powietrza wokół małżowin usznych. Z tego powodu do nagrania hałasu wiatru nie powinno się wykorzystywać typowego mikrofonu pomiarowego. Pomiary zrealizowano za pomocą sztucznej głowy firmy Bruel & Kjaer połączonej z systemem akwizycji danych LAN-XI z oprogramowaniem PULSE. Sztuczna głowa jest wyposażona w dźwiękowody, które są zakończone elastycznym odlewem ludzkiego zewnętrznego kanału słuchowego. Sygnały akustyczne rejestrowane w ten sposób uwzględniają naturalnie występujący filtr jaki stanowi dla układu słuchowego głowa i małżowina uszna, czyli tzw. *head-related transfer function* (HRTF).

Pomiar poziomów hałasu wiatru przy różnych prędkościach wiatru przeprowadzono się za pomocą miernika poziomu dźwięku firmy Svantek, typ SVAN 979. Mikrofon był wyposażony w osłonę przeciwwietrzną. Sztuczna głowa i miernik były umieszczane w świetle wylotu tunelu aerodynamicznego, w odległości ok. 0.2 m od jego krawędzi. Po ustawieniu ustalonej prędkości przepływu powietrza prowadzono naprzemiennie pomiar poziomu hałasu i nagrania. Jednocześnie prowadzono kontrolne pomiary poziomu dźwięku w bliskiej odległości (ok. 1 m) wylotu z tunelu aerodynamicznego – tego mikrofonu nie umieszczano w strumieniu wyrzucanego powietrza.

14. Etap I: Eksperymenty psychoakustyczne związane z maskowaniem hałasu turbin wiatrowych

Pierwszy etap przeprowadzonych badań obejmował 2 eksperymenty psychoakustyczne, przygotowane do weryfikacji hipotezy H1: *Hałas autostrady skutecznie maskuje hałas turbin wiatrowych*:

1. Wpływ hałasu autostrady na dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych;
2. Wpływ hałasu autostrady i wiatru na dokuczliwość hałasu turbin wiatrowych.

Celem eksperymentów było określenie skuteczności maskowania *HTW* innym, znanym źródłem hałasu. Jako masker wybrano hałas drogowy (*HD*) oraz hałas drogowy i wiatr (*HD+W*) (uzasadnienie – patrz: Rozdział 10). Zadaniem osób badanych było wskazanie, która z dwóch prezentowanych próbek, jest dla nich bardziej dokuczliwa. W obu próbkach prezentowano masker, ale tylko jedna zawierała także sygnał *HTW*. Wynikiem eksperymentu był stosunek sygnału do szumu (SNR), przy którym próbki zawierające *HTW* są równie dokuczliwe co próbki prezentujące wyłącznie dźwięki maskujące.

Wyznaczając progi dokuczliwości *HTW* na tle dźwięków maskujących, kierowano się zasadą mówiącą, że hałas, który nie jest spostrzegany nie może wywoływać dokuczliwości (patrz rozdz. 7.1). Takie podejście zastosowano po przeprowadzeniu wstępnych badań, których wyniki zaprezentowano na konferencji OSA 2022 podczas referatu pt. „*Road traffic noise influence on wind turbine noise detection*”. Wyniki eksperymentu wykazały, że badani, gdy mieli za zadanie rozpoznać *HTW* w jednej z prezentowanych próbek, robili to niemal bezbłędnie, o ile przedtem zapoznali się z nagraniem *HTW*. Wg deklaracji badanych, wcześniej nie mieli oni do czynienia z tym źródłem hałasu. Przyczyną dobrej detekcji *HTW* mogła być jego charakterystyka, cechująca się modulacją amplitudową, ułatwiającą identyfikację i percepcję (rozd. 5.4.1). Zastosowanie w eksperymentach etapu I metody polegającej na dyskryminacji dokuczliwości próbek było sprytnym obejściem pytania badanych o detekcję źródła hałasu i skupieniem się wyłącznie na dokuczliwości. Należy podkreślić, że badani nie byli informowani na żadnym etapie badania, co jest źródłem hałasu, który oceniali. Przyjęto założenie, że próbki zawierające *HTW* są bardziej dokuczliwe od próbek prezentujących tylko masker (*HD* albo *HD+W*).

Eksperymenty związane z maskowaniem *HTW* przeprowadzono już w przeszłości, jednakże metodyka i cele badań różniły się od założeń prezentowanych w tej rozprawie. (patrz: Rozdział 9.3). SNR, rozumiany jako różnica między poziomem sygnału (*HTW*) i poziomem maskera (*HD*, *HD+W*), określano na podstawie poziomów wynikających z odległości źródeł od obserwatora. Położenie *TW* w eksperymencie było kontrolowane metodą adaptacyjną *2u1d* (patrz: Rozdziały 15.5 i 14.5) w oparciu o odpowiedzi badanych. Zgodnie z wyznaczoną odległością *TW* zmieniał się prezentowany poziom hałasu. Odległość prezentacji maskera (a tym samym jego poziom hałasu) nie zmieniała się w obrębie jednego eksperymentu. W taki sposób osoby badane określały odległość od *TW*, w której *HTW* był równie dokuczliwy co prezentacja samego maskera.

Dla tak wyznaczonej odległości odczytywano korespondujący z nią poziom *HTW*, następnie zestawiano go z poziomem *HD / HD+W* w danych eksperymencie i obliczano SNR.

Odległość jako miara progu detekcji dokuczliwości *HTW* została wykorzystana by nawiązać do polskich regulacji prawnych bazujących na minimalnej odległości między *TW* a zabudową mieszkalną (patrz: Rozdział 1 i Rozdział 6). Taki zabieg pozwala na porównanie uzyskanych progów dokuczliwości z obowiązującymi przepisami prawa. Proces przygotowania eksperymentów opisano w kolejnych rozdziałach. Dokładny opis procedury eksperymentalnej znajduje się w Rozdziale 14.5.

Wyniki eksperymentu 1. zostały częściowo opisane w publikacji [108] stanowiącej Załącznik 1. do niniejszej rozprawy doktorskiej. Opublikowany artykuł powstał przed zakończeniem eksperymentu, dlatego przedstawione w nim wyniki nie są kompletne. Dyskusja i wnioski opisane w publikacji [108] stanowią zatem niepełny obraz wniosków płynących z niniejszej rozprawy.

14.1. Przygotowanie źródłowych bodźców akustycznych

Do przygotowania bodźców akustycznych w eksperymentach psychoakustycznych wykorzystano nagrania uzyskane podczas pomiarów terenowych. Dla każdego źródła *HTW* i *HD* wybrano fragmenty prezentujące typowy, niezakłócony sposób jego funkcjonowania. Wybrane fragmenty każdego ze źródeł hałasu podzielono na 10 kilkosekundowych bodźców źródłowych. Celem było zróżnicowanie prezentowanych próbek i zniwelowanie efektu uczenia się u słuchaczy. Każdy z wariantów bodźca źródłowego musiał spełniać przyjęte kryterium zgodnie, z którym różnica równoważnego poziomu dźwięku danego wariantu i równoważnego poziomu dźwięku z całego wybranego fragmentu nagrania danego źródła wynosiła (wz. 6):

$$|L_{Aeq}^{All} - L_{Aeq}^{sample}| \leq 0,2dB \quad \text{wz. 6}$$

gdzie:

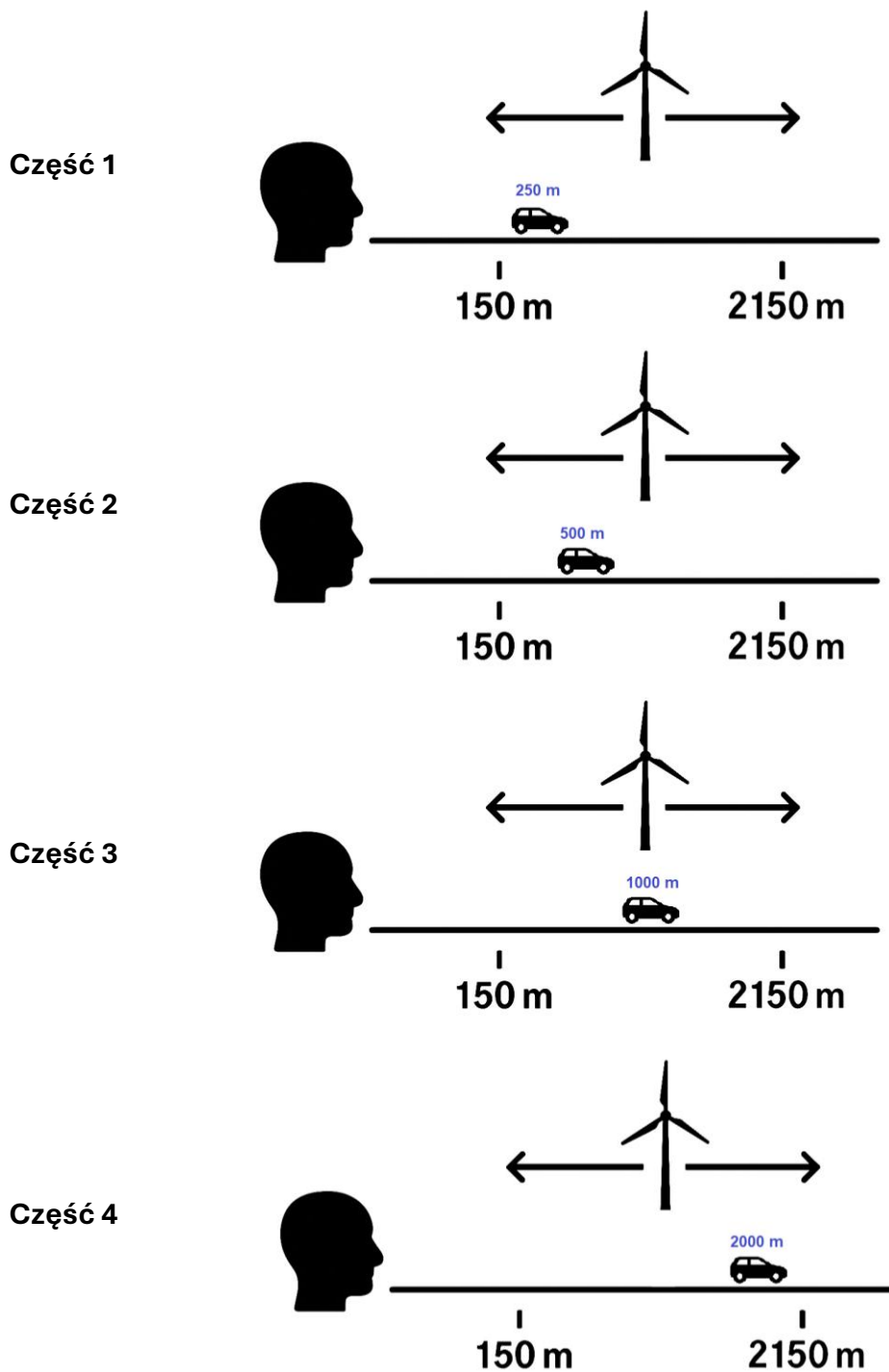
L_{Aeq}^{All} - równoważny poziom dźwięku wybranego fragmentu nagrania źródła hałasu,

L_{Aeq}^{sample} - równoważny poziom dźwięku i-tego wariantu bodźca.

W przypadku bodźców *HTW* oraz *HD* założeniem eksperymentów było odtworzenie zarejestrowanych nagrań na poziomie odpowiadającym odległościom, które nie zawsze korespondowały z odległościami, w których zarejestrowano sygnały. Z tego powodu część bodźców została wygenerowana poprzez przefiltrowanie bodźców źródłowych przez tzw. funkcję przejścia (ang. *transfer function*).

Funkcja przejścia stanowi filtr modyfikujący nagranie w sposób odzwierciedlający wpływ mechanizmów działających na drodze propagacji między źródłem a punktem obserwacji. Do takich mechanizmów można zaliczyć pochłanianie energii akustycznej przez powietrze lub wpływ odbicia od powierzchni ziemi (patrz: rozdz. 5.3). Funkcja przejścia może być obliczona dla

dowolnej odległości od źródła hałasu. Składają się z zestawu wartości wzmocnienia w pasmach tercjowych, które należy dodać do oryginalnego widma *HTW* lub *HD* by uzyskać nagranie źródła słyszanego w wybranej odległości. Funkcje przejścia obliczano na podstawie warunków panujących w trakcie pomiarów akustycznych w oparciu o metodykę Nord2000 (patrz: 8.2.1). Dla każdej wybranej odległości prezentacji bodźca, czyli „wirtualnego” położenia źródła dźwięku względem punktu obserwacji, obliczono osobną funkcję przejścia. Przefiltrowanie bodźca źródłowego przez każdą z nich skutkowało powstaniem zestawu bodźców, umożliwiających „umieszczenie” źródła w wybranej odległości od punktu obserwacji. Schemat prezentujący możliwe rozmieszczenie źródeł *HTW* albo *HD* oraz położenie punktu obserwacji przedstawia Rys. 14-1.



Rys. 14-1 Procedura przeprowadzania kolejnych części eksperymentów I i II. W każdej części TW zmieniała swoją lokalizację (i korespondujący z nią poziom hałasu) zgodnie z procedurą adaptacyjną 2u1d. Bodziec prezentujący masker HD był taki sam każdej części eksperymentu I i II.

Wybór metodyki Nord2000 był podyktowany możliwością bardzo precyzyjnego określenia w obliczeniach parametrów atmosferycznych, czego nie umożliwiają inne popularne metody modelowania (CNOSSOS-EU czy ISO 9613). Uwzględnienie dokładnych wartości warunków pogodowych ma bardzo istotne znaczenie przy obliczaniu zasięgów oddziaływania *HTW* (patrz: rozdz. 5.3).

Obliczenia funkcji przejścia przeprowadzono w programie Excel z zaimplementowanym skryptem obliczeniowym w języku Visual Basic for Applications, integrującym bibliotekę funkcji Nord2000. Parametry wejściowe wymagane do obliczeń funkcji przejścia zgodnie z metodyką Nord2000 przedstawia Tab. 14-1.

Tab. 14-1 Opis parametrów wejściowych modelu Nord2000

Parametr	Opis	Źródło danych
Wysokość źródła [m.n.p.t.]	---	Pomiary
Wysokość receptora [m.n.p.t.]	---	Pomiary
Odległość od punktu obserwacji [m]	---	Pomiary
Różnica wysokości terenu względem punktu obserwacji [m]	Podczas wszystkich pomiarów stwierdzono teren płaski, dlatego przyjmowano wartość tego parametru równą 0 m	Pomiary
Roughneslength [m]	Parametr opisujący chropowatość powierzchni, wykorzystywany do obliczania turbulencji wiatru blisko powierzchni ziemi [43]	Pomiary (obserwacja) oraz [152]
Flow resistivity σ [kNsm ⁻⁴]	Parametr opisujący oporność przepływu. Wykorzystywany m.in. do obliczania współczynnika pochłaniania dźwięku transmitowanego przez materiały porowate [153]. W modelowaniu wykorzystano wartości reprezentatywne opisane w Nord2000 [129]	Pomiary (obserwacja) oraz [129]
Wysokość pomiaru prędkości wiatru [m.n.p.t.]	---	Pomiary
Średnia prędkość wiatru [m/s]	---	Pomiary
Odchylenie standardowe prędkości wiatru	---	Pomiary
Temperatura przy poziomie terenu [°C]	Stosowano wyniki z najniższej mierzonej wysokości n.p.t.	Pomiary
Gradient temperatury Y [°C/m]	Obliczany ze wzoru: $Y = -\frac{T_2 - T_1}{h_2 - h_1} \quad \text{wz. 7}$ gdzie: T_1, T_2 – zmierzone wartości temperatury h_1, h_2 – wysokości pomiaru temperatury	Pomiary
Wilgotność powietrza [%]	---	Pomiary
Obszary zwiększonego rozpraszania na drodze propagacji (<i>scattering zones</i>)	Obszar powodujący dodatkowe pochłanianie lub rozpraszanie dźwięku. Wg [129] za takie obszary uznaje się np. tereny zabudowy mieszkalnej. W związku z brakiem występowania takich obszarów na drodze propagacji ten parametr był wykluczony z obliczeń	Pomiary

Metodyka Nord2000 pozwala prowadzić obliczenia w pasmach tercjowych w zakresie częstotliwości środkowych 25 Hz – 10 kHz [129]. Podczas pomiarów i nagrań rejestrowano sygnały z zakresu pasma słyszalnego czyli 20 Hz – 20 kHz. Pasmom tercjowym, dla których nie dało się obliczyć wartości wzmocnienia, przypisano wartość z najbliższego obliczonego pasma, czyli:

- pasmu 20 Hz przypisano wartość filtru z pasma 25 Hz,
- pasmom 12.5 kHz, 16 kHz i 20 kHz przypisano wartość filtru z pasma 10 kHz.

Do przeliczania bodźców źródłowych przez funkcję przejścia i generowania nowych bodźców akustycznych wykorzystano skrypt w języku Python, automatyzujący działanie API programu Audacity. Przeprowadzono filtrowanie bodźców źródłowych *HTW* i *HD* przez wszystkie funkcje przejścia obliczone dla danego źródła.

14.1.1. Bodźce z nagrań hałasu turbiny wiatrowej

Nagranie źródłowe *HTW* wykorzystane do przygotowania bodźców akustycznych zarejestrowano w odległości 150 m od *TW*, po zawietrznej stronie, na wysokości 1.5 m.n.p.t. (patrz: Rys. 13-1). Punkt pomiarowy blisko źródła umożliwił dokładne odwzorowanie *HTW*, zarówno pod względem przebiegu czasowego oraz charakterystyki częstotliwościowej. Mała odległość horyzontalna sprawia, że pochłanianie dźwięku na drodze propagacji jest najmniejsze, a wpływ efektu odbicia od powierzchni ziemi (ang. *ground effect*) jest zanedbywalnie mały. Wybrany fragment oryginalnego nagrania hałasu turbiny wiatrowej podzielono na 10 różnych bodźców o czasie trwania 8 sekund.

Założono, że w eksperymentach etapu I *HTW* będzie mógł być prezentowany w odległościach od punktu obserwacji równych od 150 m (odległość rzeczywistego nagrania) do 2150 m z krokiem co 10 m. Wymagało to przygotowania 200 funkcji przejścia i przeliczenia przez nie każdego z 10 wariantów bodźca źródłowego.

Parametry wejściowe do obliczeń funkcji przejścia *HTW* wg metody Nord2000 przedstawia Tab. 14-2. Wartości ustalono na podstawie wyników pomiarów akustycznych oraz z obserwacji otoczenia farmy wiatrowej w ich trakcie (patrz: 13.1). Na Rys. 14-2 przedstawiono wybrane funkcje przejścia bodźców *HTW* w pasmach tercjowych obliczone na podstawie wprowadzonych danych.

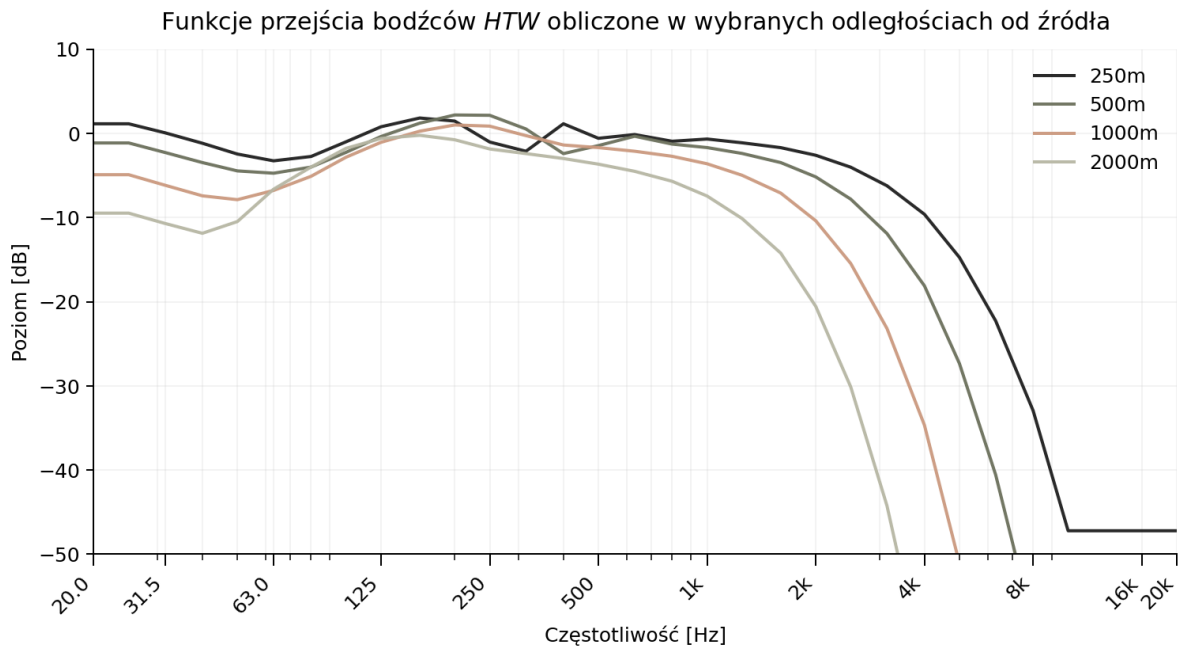
Tab. 14-2 Parametry wejściowe modelu Nord2000 do obliczenia funkcji przejścia dla hałasu turbin wiatrowych

Parametr	Wartość
Wysokość źródła [m.n.p.t.]	105.0
Wysokość receptora [m.n.p.t.]	1.5
Odległość od punktu obserwacji [m]	Zależna od obliczanej funkcji przejścia
Różnica wysokości terenu względem punktu obserwacji [m]	0.0
Roughnes length [m]	0.03 ¹⁾
Flow resistivity [kNsm^{-4}]	500 (Kat. E) ²⁾
Wysokość pomiaru prędkości wiatru [m.n.p.t.]	11.0
Średnia prędkość wiatru [m/s]	4.0
Odchylenie standardowe prędkości wiatru	0.1
Temperatura przy poziomie terenu [$^{\circ}\text{C}$]	6.0
Gradient temperatury [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$]	0.08714 ³⁾
Wilgotność powietrza [%]	58.0
Obszary zwiększonego rozpraszania na drodze propagacji (scattering zones)	brak

¹⁾ teren wokół farmy wiatrowej stawiły zaorane pola uprawne dlatego jako parametr „roughness length”, zgodnie z [152], wprowadzono wartość 0.03 odpowiadającą otwartemu terenowi pokrytemu trawą z okazjonalnymi pojedynczymi drobnymi przeszkodami.

²⁾ zgodnie z [129] teren wokół farmy wiatrowej (zaorane uprawne pola) odpowiadał terenowi o klasie impedancji E, której przypisuje się wartość parametru „flow resistivity” równą 500 kNsm^{-4} .

³⁾ gradient temperatury został obliczony na podstawie pomiarów na wysokości 11 m.n.p.t. i 4 m.n.p.t. Pomiary na wysokości gondoli były prowadzone ze zbyt dużą rozdzielczością czasową dlatego zdecydowano się na wyniki ze stacji meteo projektu HETMAN.



Rys. 14-2 Funkcje przejścia bodźców HTW obliczone w odległościach 250 m, 500 m, 1000 m i 2000 m od źródłowego bodźca HTW.

Podsumowanie wygenerowanych bodźców akustycznych wraz z odległościami prezentacji przedstawiono w Tab. 14-3.

Tab. 14-3 Podsumowanie wygenerowanych bodźców akustycznych hałasu turbin wiatrowych

Parametr	Wartość
Odległość między punktem obserwacji sygnału a rzeczywistym źródłem hałasu [m]	150
Liczba obliczonych funkcji przejścia	200
Odległość między kolejnymi odległościami prezentacji [m]	10
Odległości prezentacji wybrane do badania [m]	150 – 2150
Liczba wariantów każdego bodźca	10
Czas trwania pojedynczego bodźca [s]	8

14.1.2. Bodźce z nagrań hałasu autostrady

W eksperymentach etapu I wykorzystano bodźce *HD* odpowiadające 4 odległościom od punktu obserwacji: 250 m, 500 m, 1000 m i 2000 m. Z przeprowadzonych pomiarów akustycznych, na podstawie oryginalnych nagrań *HD*, utworzono 2 zestawy bodźców źródłowych *HD* dla odległości 250 m i 500 m. Bodźce hałasu maskera w odległości 1000 i 2000 m zostały obliczone przy pomocy funkcji przejścia na podstawie bodźców źródłowych dla 500 m.

Do obliczenia funkcji przejścia zastosowano te same parametry wejściowe co w przypadku bodźców *HTW*, zmieniając wyłącznie wysokość źródła nad poziomem terenu. Ten zabieg miał na celu odwzorowanie takich samych warunków propagacji *HD* co *HTW* dla tworzonych bodźców. Było to uzasadnione również dlatego, że ukształtowanie i pokrycie terenu były podczas obu pomiarów takie same. Warunki meteorologiczne w trakcie pomiarów *HD* i *HTW* były zbliżone różniąc się prędkością wiatru, która podczas pomiarów *HD* wynosiła średnio <1 m/s. Taka prędkość wiatru nie wpływa na zmianę zasięgu oddziaływania akustycznego autostrady. W celu ujednoczenia warunków propagacji zastosowano w obliczeniach prędkość wiatru zmierzoną podczas pomiarów *HTW*. Parametry wejściowe do obliczeń funkcji przejścia wg Nord2000 dla bodźców *HD* przedstawia Tab. 14-4.

Tab. 14-4 Parametry wejściowe modelu Nord2000 do obliczenia funkcji przejścia dla *HD*

Parametr	Wartość
Wysokość źródła [m.n.p.t.]	1.5
Wysokość receptora [m.n.p.t.]	1.5
Odległość od punktu obserwacji [m]	Zależna od obliczanej funkcji przejścia
Różnica wysokości terenu względem punktu obserwacji [m]	0.0
Roughnes length [m]	0.03
Flow resistivity [kNsm^{-4}]	500 (Kat. E)
Wysokość pomiaru prędkości wiatru [m.n.p.t.]	11.0
Średnia prędkość wiatru [m/s]	4.0
Odchylenie standardowe prędkości wiatru	0.1
Temperatura przy poziomie terenu [$^{\circ}\text{C}$]	6.0
Gradient temperatury [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$]	0.08714
Wilgotność powietrza [%]	58.0
Obszary zwiększonego rozpraszania na drodze propagacji (scattering zones)	brak

Charakterystykę wykorzystanych bodźców przedstawia Tab. 14-5.

Tab. 14-5 Charakterystyka bodźców akustycznych HD.

Parametr	Wartość
Odległość między punktem obserwacji sygnału a rzeczywistym źródłem hałasu [m]	250, 500
Dodatkowe odległości prezentacji bodźców wybrane do badania [m]	1000, 2000
Wszystkie odległości prezentacji bodźców wybrane do badania [m]	250, 500, 1000, 2000
Liczba wariantów każdego bodźca	10
Czas trwania pojedynczego bodźca [s]	8

14.1.3. Bodźce z nagrań hałasu wiatru

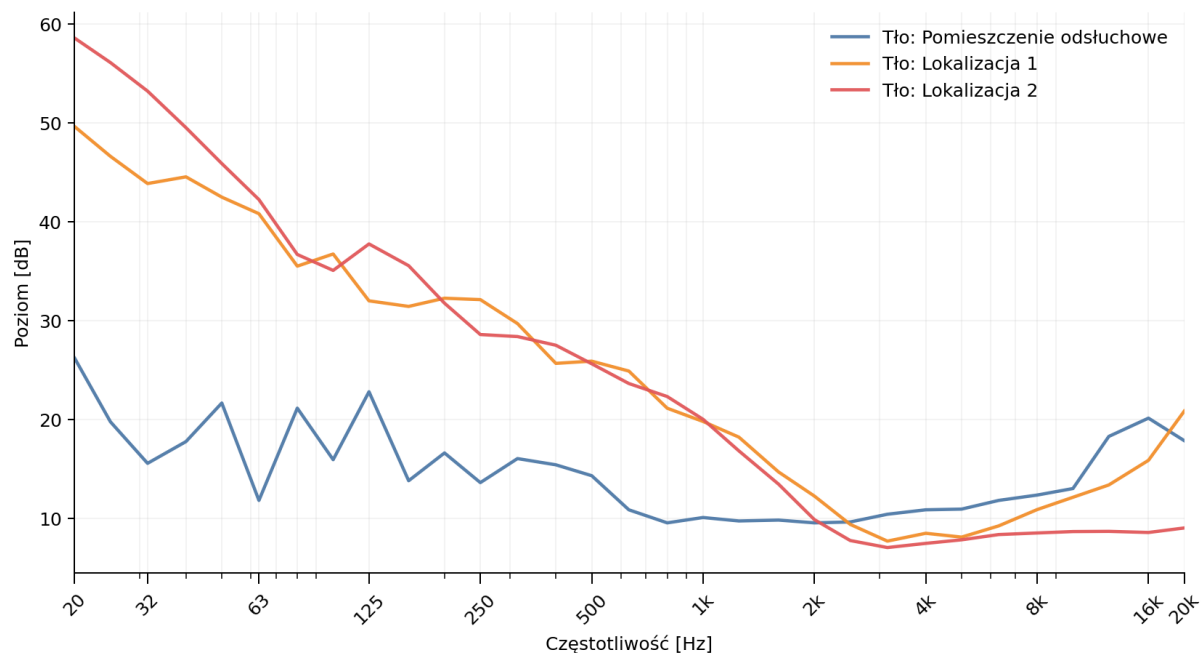
Nagrania hałasu wiatru zarejestrowane w komorze bezchowej Instytutu Techniki Ciepłej w Łodzi zostały wykorzystane w eksperymencie 2. i stanowiły dodatkowy masker dla sygnału *HTW*. W przypadku hałasu wiatru nie obliczano funkcji przejścia i nie stosowano filtrowania bodźców źródłowych. Przyjęto, że dystrybucja prędkości wiatru na obszarze otaczającym *TW* jest taka sama, dlatego niezależnie od odległości między źródłem hałasu a punktem obserwacji poziom hałasu powinien być dokładnie taki sam. Zatem prezentowanymi bodźcami hałasu wiatru były nagrania źródłowe.

Bodźce hałasu wiatru odpowiadały prędkości przepływu powietrza równej 4 m/s. Była to wartość zarejestrowana podczas pomiarów terenowych na 11 m.n.p.t.

14.2. Aparatura

Eksperymenty etapu I przeprowadzono w pomieszczeniu odstuchowym znajdującym się w przyziemiu Katedry Akustyki Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Pomieszczenie ma wymiary 3,9 m / 4,0 m / 2,7 m (szerokość / długość / wysokość). Ściany pomieszczenia odstuchowego są wyłożone panelami akustycznymi pochłaniającymi dźwięk. Na stropie zamontowano podwieszany sufit z kasetonami, na podłodze znajduje się wykładzina. Pomieszczenie stanowi element kompleksu badawczego do prowadzenia badań słuchu.

Tło akustyczne panujące w pomieszczeniu podczas badań przedstawiono na Rys. 14-3. Na wykresie zamieszczono również tło akustyczne zarejestrowane podczas pomiarów terenowych w lokalizacji 1 (patrz: 13.1.1) i lokalizacji 2 (patrz: 13.1.2).



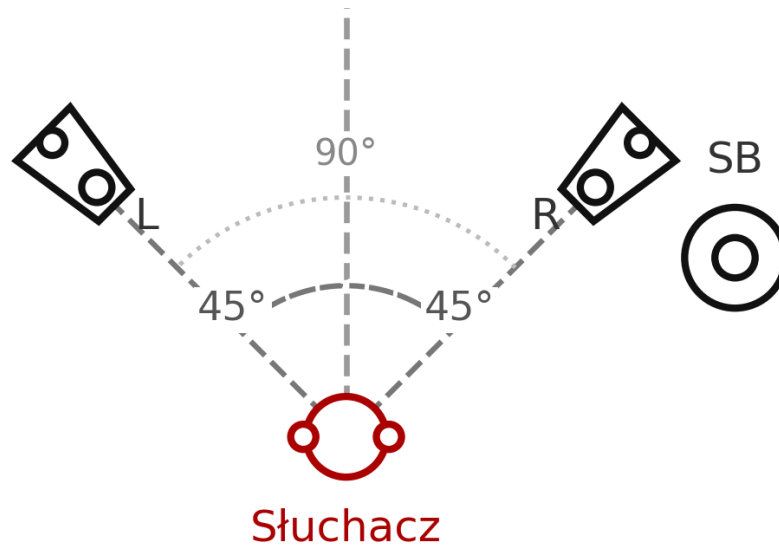
Rys. 14-3 Tło akustyczne zarejestrowane w pomieszczeniu odsłuchowym oraz na dwóch farmach wiatrowych. W trakcie pomiarów terenowych tło akustyczne zmierzono przy wyłączonych TW.

Do odtwarzania dźwięków w eksperymentach etapu I wykorzystano zestaw głośnikowy typu 2.1 (2 głośniki średnio-/wysokotonowe oraz jeden subwoofer odpowiadający na niskie pasma częstotliwości). Opis urządzeń przedstawia Tab. 14-6.

Tab. 14-6 Opis aparatury do odtwarzania dźwięków w eksperymentach etapu I

Typ	Model	Producent	Zakres pasma częstotliwości	Liczba	Odległość od słuchacza [m]	Wysokość nad podłogą [m]
monitor studyjny	HS5	Yamaha	Pasmo średnich / wysokich częstotliwości	2	1.5	1.5
subwoofer	DXS12 mkII	Yamaha	Pasmo niskich częstotliwości	1	ok. 1.5	bezpośrednio na podłodze

Monitory studyjne były ustawione pod kątem $\pm 45^\circ$ względem głównej osi słuchacza. Odległość od głośników do osoby badanej wynosił 1.5 m. Subwoofer był umieszczony w odległości ok. 1.5 m przed słuchaczem, na podłodze. Lokalizację głośników i słuchacza w pomieszczeniu odsłuchowym przedstawia Rys. 14-4.



Rys. 14-4 Lokalizacja aparatury badawczej w pomieszczeniu odstuchowym

Sygnal audio do głośników był odtwarzany poprzez kartę dźwiękową RME Babyface Pro Fs. Karta dźwiękowa była podłączona bezpośrednio do komputera sterującego eksperymentem znajdującego się przed słuchaczem w odległości ok 1.8 m. Na monitorze komputera wyświetlano instrukcje i polecenia dla osoby badanej. W pomieszczeniu znajdowało się również stanowisko operatora, kontrolującego przebieg eksperymentu. Na Rys. 14-5 zaprezentowano układ pomiarowy w trakcie eksperymentu w pomieszczeniu odstuchowym.



Rys. 14-5 Przedstawienie aparatury i pomieszczenia odstuchowego podczas eksperymentu. Na zdjęciu ukazano nadmiarową liczbę głośników, które nie były wykorzystywane podczas opisywanego eksperymentu.

14.3. Kalibracja bodźców

Kalibrację poziomów bodźców akustycznych przeprowadzono osobno dla każdego rodzaju bodźców (*HTW*, *HD* i hałasu wiatru). Kalibracja polegała na kontroli poziomu hałasu przygotowanych bodźców w punkcie odbioru rozumianym jako położenie głowy osoby badanej w trakcie eksperymentu. Wykorzystano do tego celu miernik poziomu dźwięku firmy Svantek, typ SVAN 979. Mikrofon zlokalizowano ponad siedzeniem badanego na wysokości jego głowy, na wysokości ok. 1,2 m nad podłogą.

Proces kalibracji polegał na dopasowaniu poziomu $L_p^{i'}$ bodźców kalibrowanych w pomieszczeniu odstuchowym do wartości docelowej L_p^i . Wartość docelową L_p^i należy rozumieć jako poziom dźwięku bodźca źródłowego lub poziom dźwięku bodźca, którego poziom dźwięku obliczono przy użyciu funkcji przejścia. Poziom L_p^i i $L_p^{i'}$ wyznaczano poprzez sumowanie poziomów dźwięku $L_{p,f}^i$ zmierzonych w pasmach tercjowych f odpowiednio dla i - tego bodźca kalibrowanego (wz. 8) i docelowego (wz. 9).

$$L_p^{i'} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot (L_{p,f}^i + a_f^i)} \right) \quad \text{wz. 8}$$

$$L_p^i = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot (L_{p,f}^i)} \right) \quad \text{wz. 9}$$

gdzie: a_f^i – wartość wzmocnienia f -pasma, i -tego bodźca docelowego

Proces kalibracji polegał na wyznaczeniu wzmocnienia a_f^i w pasmach tercjowych dla którego było spełnione kryterium kalibracji (wz. 10):

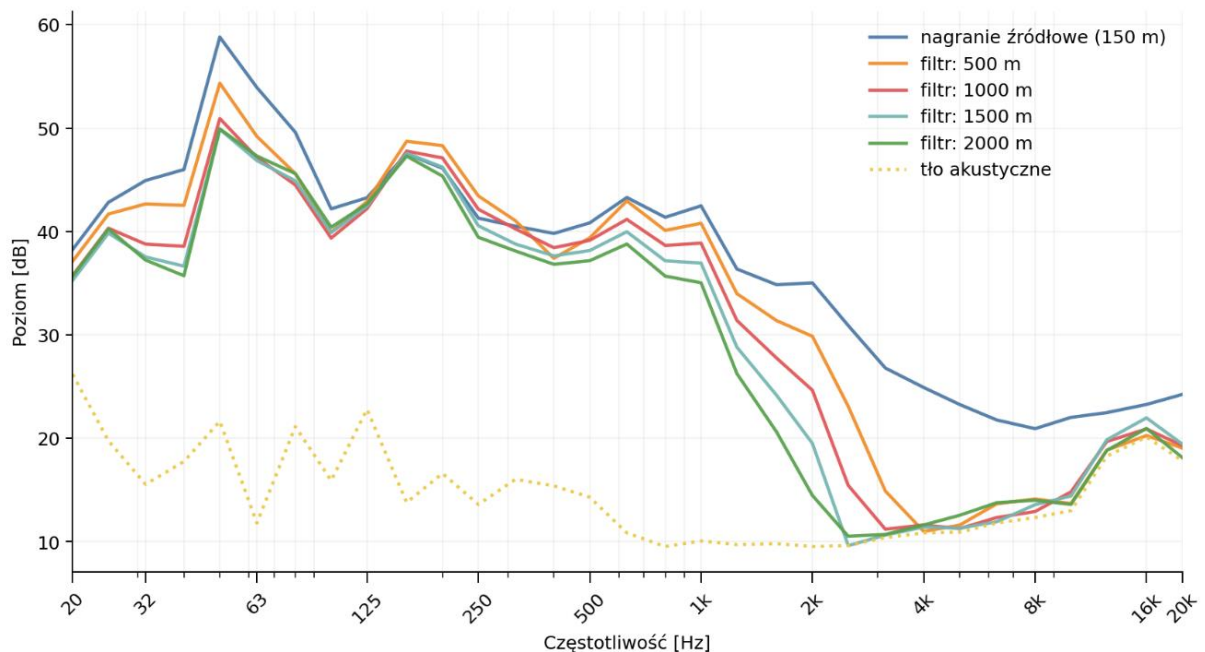
$$|L_p^{i'} - L_p^i| \leq 1 \text{ dB}, \quad \text{wz. 10}$$

gdzie: L_p^i – poziom dźwięku i -tego bodźca zarejestrowany podczas pomiarów terenowych,
 $L_p^{i'}$ - poziom i -tego bodźca docelowego odtworzony w pomieszczeniu odstuchowym,

14.3.1. Kalibracja bodźców akustycznych hałasu turbin wiatrowych

Do prezentacji w eksperymentach *HTW* przygotowano 200 bodźców odpowiadających hałasowi prezentowanemu w przedziale odległości 150 m – 2 150 m od obserwatora z krokiem co 10 m. Z uwagi na liczbę kalibrowanych bodźców, zdecydowano się na kalibrację bodźca źródłowego (150 m) oraz kilku bodźców wygenerowanych z pomocą funkcji przejścia. Skalibrowane bodźce prezentowały *HTW* w odległościach: 150 m, 650 m, 1150 m, 1650 m i 2150 m. Pozostałym bodźcom, prezentującym *HTW* w odległościach „pomiędzy” bodźcami skalibrowanymi przypisano wzmocnienie a_f^i wynikające z zależności liniowej. Po skalibrowaniu wybranych bodźców sprawdzono kryterium kalibracji (wz. 10) na losowo wybranych bodźcach, którym przypisano wzmocnienie a_f^i z zależności liniowej. Kryterium było spełnione bez konieczności poprawy wzmocnienia a_f^i .

Wykres przedstawiony na Rys. 14-6 prezentuje widma skalibrowanych bodźców *HTW*. W Tab. 14-7 przedstawiono poziomy dźwięku skalibrowanych bodźców oraz poziom tła akustycznego w pomieszczeniu odstuchowym.



Rys. 14-6 Średnie widma bodźców *HTW* dla wybranych do kalibracji filtrów. Widma zarejestrowano w pomieszczeniu odstuchowym, dlatego na wykresie znalazło się panujące w nim tło akustyczne.

Tab. 14-7 Równoważne poziomy dźwięku kalibrowanych bodźców HTW oraz typowe tło akustyczne w pomieszczeniu odłuchowym.

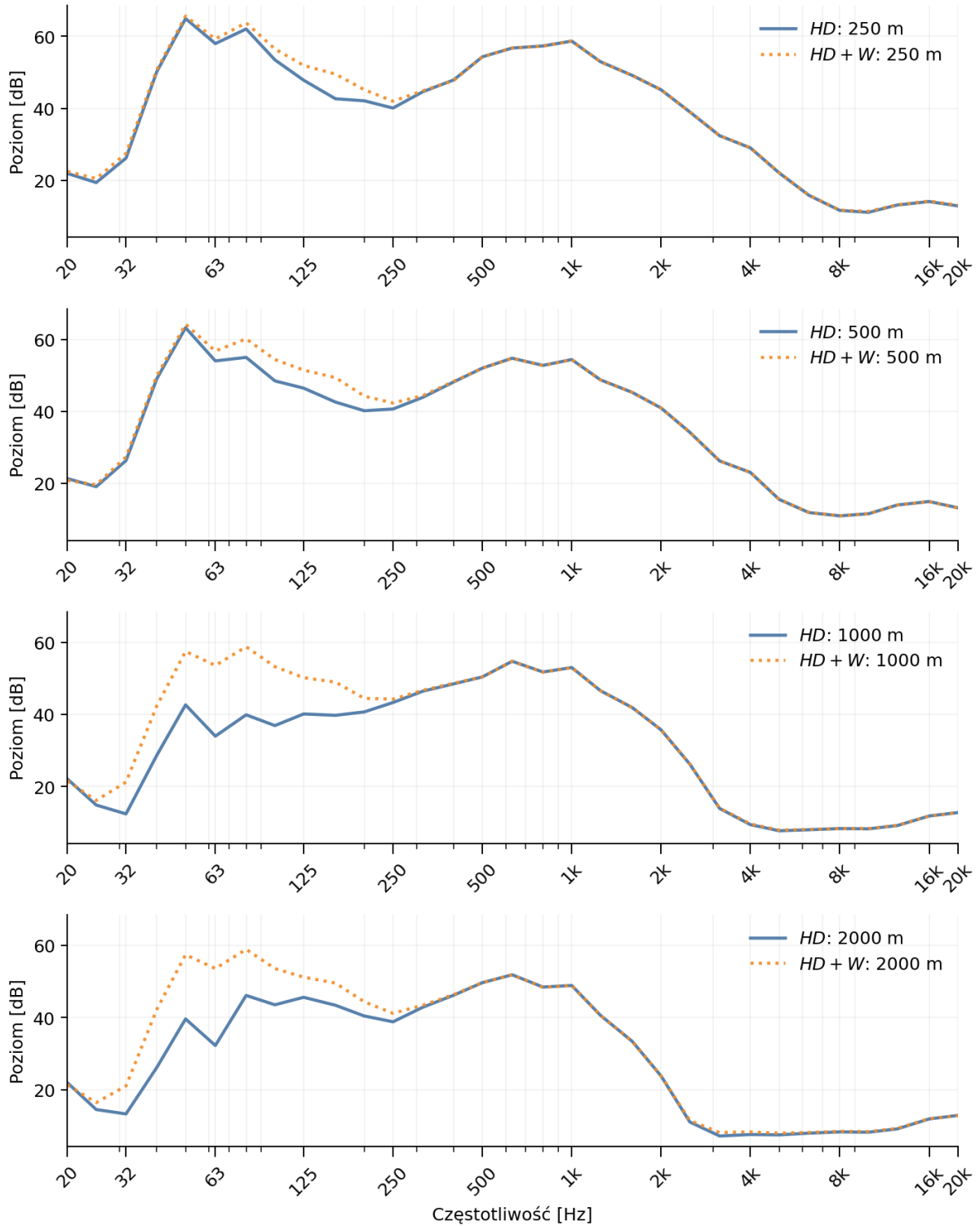
Odległość prezentacji [m]	Źródło poziomu kontrolnego	Równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} [dBA]	Równoważny ciśnienia akustycznego L_{eq} [dB]
150	Wynik pomiarów terenowych	49.1	61.6
500	Wynik obliczeń wg Nord2000 na podstawie pomiarów w odl. 150 m	47.9	58.5
1 000		46.5	56.5
1 500		45.2	55.8
2 000		44.1	55.7
typowe tło akustyczne w pomieszczeniu odłuchowym		24.1	32.3

14.3.2. Kalibracja bodźców akustycznych hałasu drogowego

Przygotowane bodźce prezentowały *HD* w 4 odległościach: 250 m, 500 m, 1000 m i 2000 m. Bodźce prezentujące *HD* w odległościach 1000 m i 2000 m zostały wygenerowane na bazie bodźców wzorcowych zarejestrowanych w odległości 500 m. Przeprowadzono kalibrację wszystkich bodźców *HD*. Tab. 14-8 przedstawia charakterystykę bodźców *HD* i bodźców *HD+W* zestawionych dla tych samych odległości prezentacji bodźca *HD*. Widma skalibrowanych bodźców *HD* zaprezentowano na Rys. 14-7.

Tab. 14-8 Charakterystyka bodźców hałasu autostrady

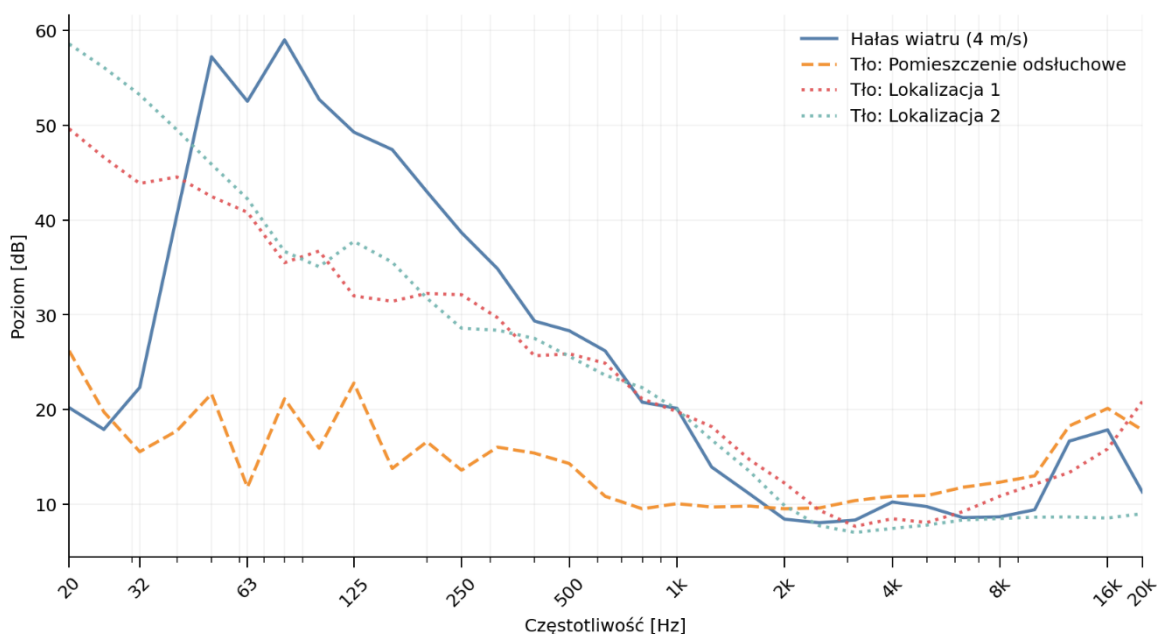
Odległości prezentacji bodźców <i>HD</i> [m]	Źródło poziomu kontrolnego	Bodźce <i>HD</i>		Bodźce <i>HD+W</i>	
		Równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} [dBA]	Równoważny poziom ciśnienia akustycznego L_{eq} [dB]	Równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} [dBA]	Równoważny poziom ciśnienia akustycznego L_{eq} [dB]
250	Wynik pomiarów terenowych	63.1	69.0	63.2	70.1
500		59.5	65.9	59.6	67.8
1 000	Wynik obliczeń wg Nord2000 na podstawie pomiarów w odl. 500 m	58.4	60.1	58.5	64.7
2 000		55.1	58.0	55.2	64.1



Rys. 14-7 Średnie widma bodźców HD i HD+W. Widma zarejestrowano w pomieszczeniu odstuchowym.

14.3.3. Kalibracja hałasu wiatru

W eksperymencie 2. jako dodatkowy masker wykorzystano nagrania wiatru o prędkości 4 m/s. Nagrania bodźców przeprowadzono przy użyciu sztucznej głowy i miernika poziomu dźwięku ustawionych w strumieniu powietrza. Uzyskane wyniki znacznie się różniły: poziom hałasu zarejestrowany sztuczną głową był znacząco wyższy niż hałas zarejestrowany miernikiem dźwięku. Odtwarzanie hałasu wiatru w pomieszczeniu odstuchowym na poziomie zmierzonym sztuczną głową powodował przesterowanie aparatury. Z tego powodu bodźce akustyczne utworzono w oparciu o sygnał akustyczny nagrany sztuczną głową skalibrowanym do poziomu zarejestrowanego na mierniku poziomu dźwięku. Na Rys. 14-8 przedstawiono skalibrowane widmo szumu wiatru. W Tab. 14-9 przedstawiono całkowite poziomy dźwięku skalibrowanych bodźców hałasu wiatru i tła akustycznego w pomieszczeniu odstuchowym.



Rys. 14-8 Średnie widmo akustyczne bodźców hałasu wiatru. Na wykresie umieszczono również widmo typowego tła akustycznego panującego w pomieszczeniu odstuchowym i tła akustyczne zarejestrowane podczas pomiarów terenowych.

Tab. 14-9 Poziomy dźwięku pozostałych bodźców akustycznych wykorzystywanych w eksperymentach 2. i 3.

Rodzaj bodźca	Równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} [dBA]	Równoważny poziom ciśnienia akustycznego L_{eq} [dB]	Czas trwania pojedynczego bodźca [s]	Liczba wariantów każdego bodźca
Wiatr (4 m/s)	42.2	62.6	8	10
Typowe tło akustyczne w pomieszczeniu odstuchowym	24.1	32.3	---	---

14.4. Kryteria doboru uczestników eksperymentu

W Etapie I brały udział dobrowolnie zgłoszone osoby. W każdym eksperymencie Etapu I brało udział po 27 osób. Kryterium udziału w badaniach był prawidłowy słuch, który sprawdzano u każdej osoby badanej przed rozpoczęciem eksperymentu. Badanie audiometrii tonalnej przeprowadzono dla częstotliwości 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz oraz 8000 Hz korzystając z audiometru Interacoustics AC40. Wśród zgłoszonych osób nie stwierdzono podwyższenia progów słyszenia powyżej 25 dB HL dla żadnej z częstotliwości.

Liczbę słuchaczy niezbędnych do wykazania statystycznie istotnych różnic obliczono wykorzystując Test F ANOVA dla pomiarów powtarzanych i czynnikach wewnątrzgrupowych.

Przy założeniu mocy statystycznej $(1 - \beta) = 80\%$ [154], poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wielkości efektu $(f) = 0,25$ i błędzie II rodzaju $\beta = 0,2$ wymagana liczba słuchaczy wnosi 24 osoby. Liczba zgłoszonych badanych wskazała na 81,6% moc statystyczną eksperymentów.

Wiek badanych mieścił się w przedziale od 18 do 50 lat, ze średnią wynoszącą 23 lata. Po zakończeniu eksperymentów badani byli pytani czy kiedykolwiek słyszeli *HTW*, czy kiedykolwiek znajdowali się w pobliżu *TW* oraz jaki jest ich stosunek do technologii wiatrowej. Wszystkie osoby badane oświadczyły, że:

- nie miały okazji wcześniej słyszeć *HTW*,
- nie znajdowały się w bliskiej odległości od *TW* - na tyle blisko by usłyszeć generowany hałas,
- są pozytywnie nastawione do OZE, technologii wiatrowej i nie mają do nich uprzedzeń.

Po zakończeniu każdego eksperymentu badani otrzymywali wynagrodzenie finansowe.

14.5. Metoda badawcza

Celem eksperymentów przeprowadzonych w etapie I było określenie progu „detekcji dokuczliwości” HTW na tle dźwięków maskujących. Badani mieli za zadanie wskazywać próbkę, która ich zdaniem była bardziej dokuczliwa. Słuchacze nie byli informowani co jest źródłem dźwięków by:

- zredukować wpływ ewentualnego osobistego nastawienia do TW ,
- określić granicę detekcji, przy której wpływ na ocenę dokuczliwości ma sygnał TW , czyli z punktu widzenia subiektywnej oceny jest dominującym źródłem.

Do wyznaczenia progów spostrzegania HTW na tle dźwięku maskującego zastosowano metodę 2AFC [155] (*Two-alternative forced choice*). Metoda 2AFC zakłada prezentację dwóch próbek, spośród których badany wybiera tylko jedną, którą uważa za poprawną odpowiedź. Wskazanie próbki zawierającej bodziec HTW na tle maskera było traktowane jako poprawna odpowiedź. Wskazanie próbki zawierającej jedynie masker było uznawane za niepoprawną odpowiedź. Tylko jedna z prezentowanych próbek zawierała bodziec prezentujący HTW i masker czyli poprawną odpowiedź. Na każdym etapie eksperymentu badany musiał udzielić odpowiedzi nawet wtedy gdy, nie był pewien wyboru lub nie znał poprawnej odpowiedzi. W takiej sytuacji wybór miał zostać dokonany w sposób losowy. Na podstawie udzielanych odpowiedzi poziom bodźca HTW prezentującego poprawną odpowiedź był dopasowywany tak by weryfikować poprzednie odpowiedzi osoby badanej w następujący sposób:

- jeżeli udzielono poprawnej odpowiedzi to poziom bodźca HTW w następnej iteracji eksperymentu był zmniejszany, by utrudnić ponowne wskazanie poprawnej odpowiedzi;
- jeżeli udzielono niepoprawnej odpowiedzi to poziom bodźca HTW w następnej iteracji eksperymentu był zwiększany, by ułatwić wskazanie poprawnej odpowiedzi.

Wartość poziomu bodźca HTW prezentowanego w następnej iteracji eksperymentu była obliczana wg wz. 11:

$$L_{dist_1}^{HTW} \mp \Delta L_{\pm X}^{HTW} = L_{dist_1 \pm X}^{HTW} = L_{dist_2}^{HTW} \quad \text{wz. 11}$$

gdzie:

$L_{dist_1}^{HTW}$ poziom zaprezentowanego bodźca HTW , który odpowiada jej położeniu w odległości równej $dist_1$ od punktu obserwacji,

$L_{dist_2}^{HTW}$ poziom bodźca HTW , który zostanie zaprezentowany w kolejnej iteracji eksperymentu. Poziom odpowiada położeniu TW w odległości równej $dist_2$ od punktu obserwacji,

$\Delta L_{\pm X}^{HTW}$ zmiana poziomu bodźca HTW w następnej iteracji eksperymentu. Znak przy zmiennej zależy od poprawności odpowiedzi: „+” przy odpowiedzi niepoprawnej oraz „-” przy odpowiedzi poprawnej. Wartość zmiany równa się różnicy poziomów bodźców HTW odpowiadającej przybliżeniu/odsunięciu TW od punktu obserwacji o odległość X ,

X odległość jako zmienna decydująca o za wielkości zmiany poziomu bodźca HTW w kolejnej iteracji eksperymentu. Zmienna przyjmowała mniejsze wartości ze zbioru (150, 50, 20 m) wraz z postępem badania.

Przykładowo: badany udzielił poprawnej odpowiedzi wskazując próbkę zawierającą bodziec HTW , dlatego w następnej iteracji eksperymentu zaprezentowano mu bodziec HTW o zmniejszonym poziomie obliczonym wg wz. 11. Od poziomu zaprezentowanego bodźca $L_{dist_1}^{HTW} = L_{250m}^{HTW}$ (odpowiadającego położeniu TW w odległości $dist_1 = 250$ m od słuchacza) odjęto różnicę poziomów ΔL_{+50m}^{HTW} odpowiadającą odsunięciu położenia TW od słuchacza o dystans $X = 50$ m. Poziom bodźca HTW w następnej iteracji eksperymentu jest zatem równy $L_{300m}^{HTW} = L_{250m}^{HTW} - \Delta L_{+50m}^{HTW}$. Oznacza to, że zmiana poziomu bodźca akustycznego odpowiadała prezentacji HTW jak gdyby znajdowała się bliżej/dalej od punktu obserwacji.

Różnica poziomów $\Delta L_{\pm X}^{HTW}$ wynikała z pochłaniania energii fali akustycznej na drodze propagacji równej $d_{prop} = dist_2 - dist_1$. Wartości poziomów HTW reprezentujące możliwe odległości TW od punktu obserwacji określono zgodnie z metodyką Nord2000 (patrz: 14.1.1).

Przy dopasowaniu poziomu bodźców HTW zastosowano procedurę adaptacyjną „2u1d” czyli 2-up, 1-down. Zasada to określa liczbę odpowiedzi poprawnych, które muszą nastąpić po sobie po kolei by poziom bodźca HTW mógł zostać zmniejszony (2-up) oraz liczbę odpowiedzi niepoprawnych, po których natężenie bodźca HTW zostanie zwiększone (1-down).

Pary próbek prezentowano w seriach. W każdej iteracji odtwarzano dwie próbki: w obu prezentowano bodziec maskujący (HD albo $HD+W$), ale tylko jedna z nich zawierała bodziec HTW . Zmiany poziomów w kolejnych iteracjach dotyczyły wyłącznie bodźców HTW . Bodźce maskujące czyli HD lub $HD+W$ prezentowano na stałym poziomie odpowiadającym odległości, w której przeprowadzono pomiary terenowe źródła.

Różnicę poziomów $\Delta L_{\pm X}^{HTW}$ dopasowywano za pośrednictwem zmiennej X za każdym razem, gdy osiągnęto tzw. punkt zwrotny. Wartość X zmniejszano przy zmianie tendencji udzielanych odpowiedzi, gdy:

- po zmniejszeniu poziomu bodźca HTW (2 poprawne odpowiedzi, „2-up”) osoba badana udzielała niepoprawnej odpowiedzi („1-down”) i poziom bodźca HTW w następnej iteracji miał być zwiększony;
- po zwiększeniu poziomu bodźca HTW (1 niepoprawna odpowiedź, „1-down”) osoba badana udzielała dwóch poprawnych odpowiedzi pod rząd („2-up”) i poziom bodźca HTW w następnej iteracji miał być zmniejszony.

Zmienna X przyjmowała wartości 150 m, 50 m i 20 m. Zmniejszanie różnicy poziomów $\Delta L_{\pm X}^{HTW}$ służyło stopniowemu, coraz dokładniejszemu określaniu granicy dyskryminacji próbek zawierających dźwięki HTW względem próbek prezentujących wyłącznie HD / $HD+W$.

Eksperyment kończył się gdy dla najmniejszej wartości zmiennej $X = 20$ m osiągnięto 5 punktów zwrotnych. Obliczano średni poziom bodźca HTW z wartości $L_{dist_1}^{HTW}$, dla których uzyskano

ostatnich 5 punktów zwrotnych. Wartość tę traktowano jako próg dyskryminacji *HTW* na tle dźwięków maskujących *HD / HD+W*.

Od wartości progu spostrzegania *HTW* na tle maskera odejmowano równoważny poziom bodźca maskującego wykorzystanego w danym eksperymencie, tj. *HD* albo *HD+W*. W rezultacie uzyskiwano stosunek sygnału do szumu SNR wyrażony w dB. Opisaną metodę badawczą zaimplementowano w oprogramowaniu PsychoPy-2022.1.1 [156], bazującym na języku programowania Python.

Każdy eksperyment składał się z 4 części. Kolejność przeprowadzania poszczególnych części była losowa dla każdego słuchacza. Każda z części korespondowała z innym poziomem maskera *HD / HD+W* odpowiadającym odległości, w której przeprowadzono pomiary (patrz: rozdz. 13.2). Odległości pomiarowe wynosiły 250 m, 500 m, 1000 m oraz 2000 m. Charakterystyka bodźców została przedstawiona w Tab. 14-8.

W pierwszym eksperymencie jako masker wykorzystano wyłącznie bodźce autostrady (*HD*). W drugim eksperymencie bodźce *HD* połączone z nagraniami wiatru (patrz: rozdz. 13.3). Celem tej modyfikacji było określenie zmiany progu „detekcji dokuczliwości” *HTW* przy naturalnie występującym maskerze w postaci wiatru. Wybrana prędkość wiatru 4 m/s odpowiadała średniej prędkości wiatru zarejestrowanej w trakcie pomiarów terenowych na wysokości 11m.

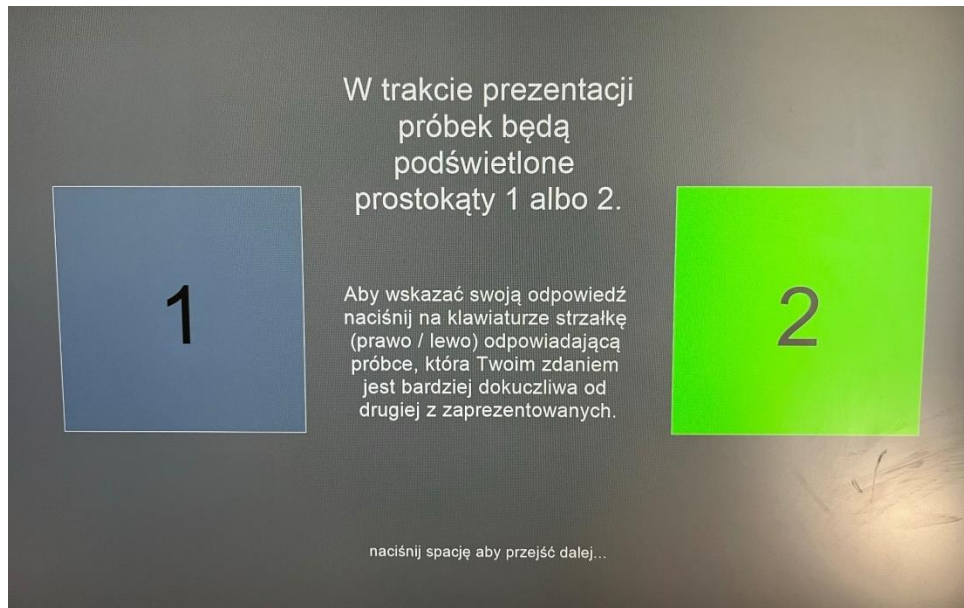
14.5.1. Procedura eksperymentów

Ekspertymenty przeprowadzono zgodnie z następującą procedurą:

- 1) Przeprowadzano wywiad i badania słuchu (patrz: 14.4). Podczas wywiadu zadawano pytanie o wiek, płeć, osoby badane wyraziły zgodę na dobrowolny udział w eksperymencie. Badani byli informowani, że w dowolnym momencie, bez podania przyczyny, mogą wycofać swój udział w eksperymencie. Informowano również, że wszystkie prezentowane próbki zostaną odtworzone jednokrotnie bez możliwości ich powtórzenia.
- 2) Po zajęciu przez osobę badaną miejsca oznaczonego na Rys. 14-4, losowano kolejność w jakiej przeprowadzano kolejne części eksperymentu.
- 3) Rozpoczynano eksperyment zgodnie z wylosowaną kolejnością przeprowadzania części eksperymentu. Na ekranie komputera sterującego eksperymentem wyświetlano instrukcje dla osoby badanej. Treść instrukcji brzmiała:

„Twoim zadaniem w tym badaniu będzie wskazanie, które z prezentowanych dźwięków są dla Ciebie bardziej dokuczliwe. Na każdym kroku zaprezentowane zostaną dwie krótkie próbki dźwiękowe. Twoim zadaniem jest wskazać, która z nich jest dla Ciebie bardziej dokuczliwa. Aby wskazać swoją odpowiedź naciśnij na klawiaturze strzałkę (prawy / lewy) odpowiadającą próbce, która Twoim zdaniem jest bardziej dokuczliwa od drugiej z zaprezentowanych.”

- 4) Na ekranie komputera prezentowano przykład: prostokąty umieszczone po prawej i lewej stronie ekranu podświetlały się w trakcie prezentacji odpowiadającej im pierwszej lub drugiej próbki. Rys. 14-9 prezentuje ekran wyboru próbki zawierającej bardziej dokuczliwe bodźce, wyświetlany podczas eksperymentu. Po zadeklarowaniu gotowości osoba badana rozpoczynała eksperyment naciśnięciem przycisku. Eksperyment rozpoczął się prezentacją bodźca hałasu turbiny wiatrowej na poziomie odpowiadającym położeniu TW w odległości 300 m od punktu obserwacji.



Rys. 14-9 Ekran wyboru próbki zawierającej bardziej dokuczliwe dźwięki.

- 5) Prezentowano dwie, 8-sekundowe próbki składające się z: (1) bodźca/ów maskujących i (2) bodźca/ów maskujących oraz bodźca HTW prezentowanego na ustalonym przez algorytm eksperymentu poziomie. Kolejność prezentacji była losowa. Zgodnie z założeniem eksperymentu wybór próbki zawierającej bodziec HTW na tle maskera był uznawany za poprawną odpowiedź. Na ekranie komputera pojawiało się polecenie:

*Za pomocą strzałki „prawo / lewo”
wybierz próbkę, która była dla Ciebie bardziej dokuczliwa.*

Do czasu udzielenia przez osobę badaną odpowiedzi eksperyment wstrzymywał prezentację kolejnych bodźców. Badani nie mieli możliwości ponownego odsłuchania próbek.

- 6) Po udzieleniu przez badanego odpowiedzi aktualizowano poziom bodźca HTW w następnej prezentacji: przy odpowiedzi poprawnej zmniejszano poziom bodźca HTW , przy odpowiedzi niepoprawnej zwiększano poziom HTW . Różnica poziomów $\Delta L_{\pm X}^{HTW}$ była zależna od zmiennej X , która przyjmowała kolejno wartości: 150 m, 50 m i 20 m. Wartość X aktualizowano po każdym osiągnięciu „punktu zwrotnego”.

- 7) Eksperyment kontynuowano od pkt. 5). Po uzyskaniu 5 punktów zwrotnych w danej części eksperymentu obliczano dla niej granicę dyskryminacji *HTW* na tle dźwięków maskujących.
- 8) Zarządzano ok. 5-minutową przerwę, wietrzono pomieszczenie i rozpoczynano następną część eksperymentu zgodnie z kolejnością wylosowaną w pkt. 2).

Po każdej części eksperymentu określano próg różnicowania dokuczliwości *HTW* na tle maskera przypisanego do danej części eksperymentu.

14.5.2. Ocena dokuczliwości hałasu

Każda z części eksperymentów trwała średnio przynajmniej 10-15 minut, w zależności od słuchacza. Jest to wystarczający czas by zaznajomić się z dźwiękami i świadomie zdecydować o ich dokuczliwości. Po zakończeniu każdej części eksperymentów badanych proszono o ocenienie dokuczliwości hałasu, który usłyszeli wg 11-stopniowej skali oceny dokuczliwości wg ICBEN [115]. Instrukcja na ankiecie miała następującą treść:

Wyobraź sobie dwie sytuację: w pierwszej chcesz po dniu w pracy lub szkole wypocząć i zrelaksować się; w drugiej masz do wykonania trudną umysłową pracę wymagającą skupienia. Teraz oceń, jak bardzo dźwięki, które usłyszałeś/-eś w ostatnim eksperymencie utrudniałyby bądź uniemożliwiały Ci to?

Dodatkowo proszono by osoby badane zapisały kryteria, które pomagały im wybrać bardziej dokuczliwą próbkę z prezentowanej pary. Chodziło o opisanie zjawisk, parametrów dźwiękowych albo odczuć, wywołanych przez usłyszane bodźce, które wywoływały u nich dokuczliwość.

15. Etap II: Wpływ zastąpienia widoku źródła na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

Eksperyment przeprowadzony w etapie II badań koncentrował się na interakcji wzrokowo-słuchowej przy ocenie dokuczliwości *HTW* i potencjalnego wykorzystania zastąpienia (zamaskowania widoku) jako metody redukcji hałasu. W eksperymencie wykorzystano gogle do prezentacji wirtualnej rzeczywistości (*VR*) i prezentację dźwięku przestrzennego w specjalnie przygotowanych audiowizualnych, trójwymiarowych scenach.

15.1. Przygotowanie bodźców audiowizualnych

Bodźce audiowizualne przygotowano poprzez połączenie bodźców słuchowych i bodźców wzrokowych. Oba łączone bodźce odpowiadały prezentacji *TW* w tej samej odległości od punktu obserwacji.

Bodźce słuchowe utworzono na podstawie nagrań i pomiarów *HTW*, przeprowadzonych na farmie wiatrowej w lokalizacji 2 (patrz: rozdział 13.1.2). Nagrania zrealizowano mikrofonem ambisonicznym co umożliwiło przestrzenną rekonstrukcję dźwięku. Bodźce wzrokowe utworzono w środowisku Unity [157] na podstawie dokumentacji fotograficznej i obserwacji przeprowadzonych podczas pomiarów terenowych.

15.1.1. Bodźce słuchowe

Nagrania turbiny wiatrowej, na których bazowały bodźce słuchowe w eksperymentach audiowizualnych, pochodziły z pomiarów w lokalizacji 1 opisanych w rozdziale 13.1.1. Wykorzystano nagrania zarejestrowane w odległościach 500 m, 750 m oraz 1000 m od *TW* na wysokości 1,5 m. Kontrolne poziomy dźwięku zmierzono w tych samych punktach.

Na podstawie nagrań w każdej odległości przygotowano po 3 bodźce, trwających po 30 sekund każdy. Wszystkie bodźce *HTW* związane z daną odległością rejestracji posiadały takie same poziomy i widmo, ale nieznacznie różniły się między sobą przebiegiem czasowym.

Do utworzenia bodźców słuchowych wykorzystano zarejestrowane nagrania. Każde nagranie podzielono na 30-sekundowe bodźce. Dla każdej odległości w której rejestrowano nagrania wybrano 3 bodźce o tej samym poziomie i charakterystyce widmowej. Bodźce różniły się nieznacznie przebiegiem czasowym po to by badani nie słuchali wielokrotnie tego samego sygnału.

Kalibrację bodźców przeprowadzono za pomocą sztucznego ucha Bruel & Kjaer typ 4153 podłączonego do miernika poziomu dźwięku Svantek typ. SVAN 979. Ustawiano wzmocnienie bodźców w taki sposób by poziomy zarejestrowane za pomocą sztucznego ucha odpowiadały poziomom zarejestrowanym podczas pomiarów. Poziomy dźwięku bodźców zarejestrowanych w odległości 500 m, 750 m oraz 1000 m od *TW* przedstawiono w Tab. 15-1

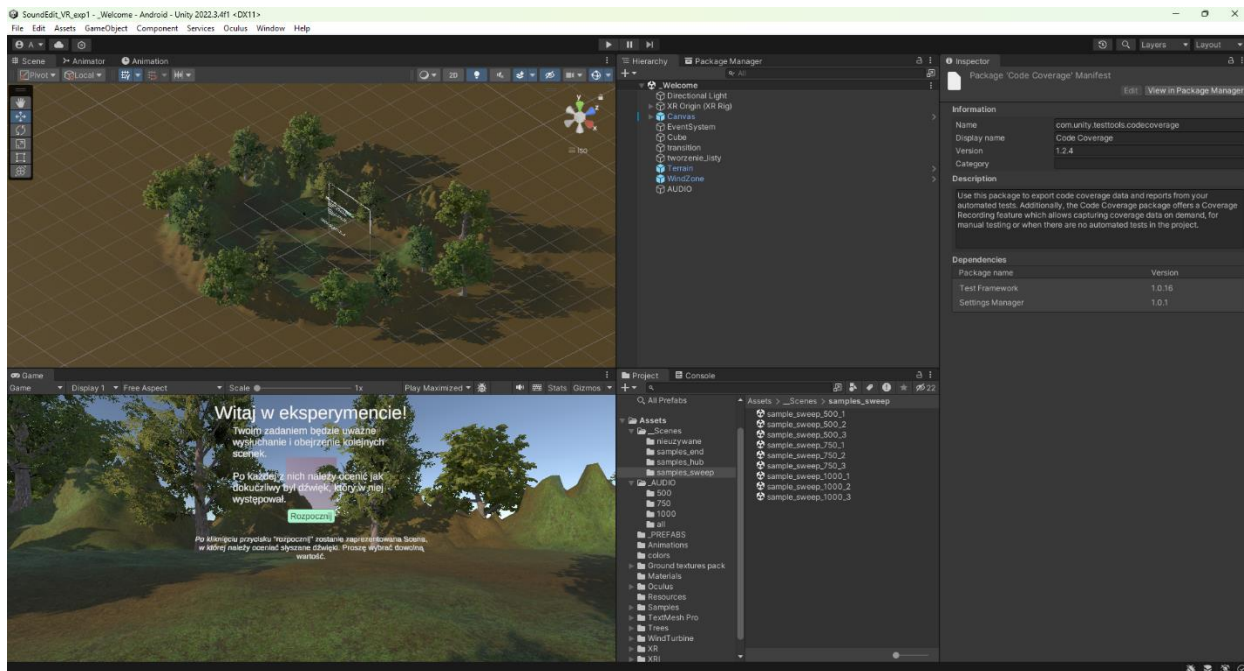
Tab. 15-1 Poziomy dźwięku bodźców słuchowych wykorzystanych w eksperymencie 3.

Odległość rejestracji nagrania [m]	Poziom bodźca akustycznego [dBA]
500	43,0
750	40,7
1000	37,5

15.1.2. Bodźce wzrokowe

Bodźce wzrokowe przygotowywano pod kątem wykorzystania w środowisku VR. Wirtualna rzeczywistość umożliwia prezentację trójwymiarowych obiektów w bardzo realistycznej scenarii. Poczucie „znajdowania się” w wygenerowanym świecie następuje poprzez prezentowanie go bezpośrednio przed oczami słuchacza. Badani z większym zaangażowaniem biorą udział w takim eksperymencie.

Bodźce wzrokowe przedstawiały typowe dla lokalizacji farm wiatrowych sceny. Inspiracją do utworzenia bodźców były zdjęcia, nagrania video i obserwacje z pomiarów terenowych. Bodźce wzrokowe przygotowano w środowisku deweloperskim Unity (wersja 2022.3.4f1.) [157]. Unity jest oprogramowaniem umożliwiającym tworzenie animacji, wizualizacji i gier komputerowych. Unity posiada gotowy kompilator, pozwalający bez znajomości programowania tworzyć programy obsługiwane przez dowolne urządzenie, również gogle VR. Na Rys. 15-1 przedstawiono interfejs programu Unity w trakcie przygotowywania eksperymentu.



Rys. 15-1 Interfejs graficzny programu Unity wykorzystanego do przygotowania i kompilacji eksperymentu 3.

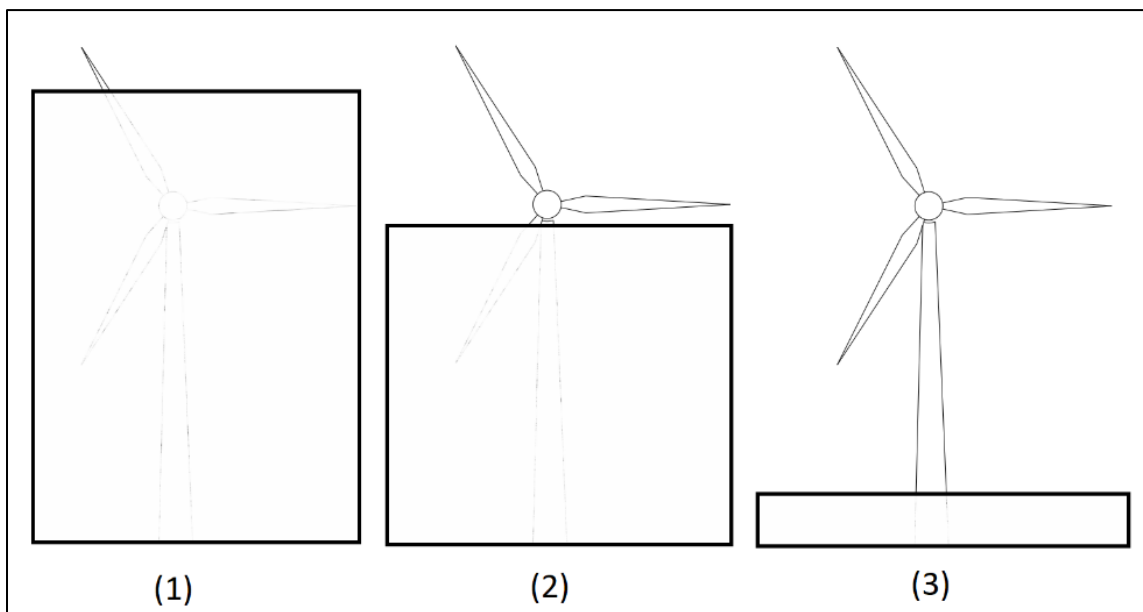
Przygotowane bodźce stanowiły w pełni animowane sceny przedstawiające otwartą przestrzeń, płaski teren pokryty trawą, na środku którego, w znacznej odległości od punktu obserwatora, stała pracująca turbina wiatrowa. Wszystkie modele 3D wykorzystane do przygotowania bodźców wzrokowych pochodziły z biblioteki Unity AssetStore. Wykorzystano model turbiny wiatrowej wzorowany na Vestas V90, a także modele drzew, trawy z dynamicznym szkieletem

reagujących na efekty podmuchu wiatru. Do kontroli animacji i przebiegu eksperymentu wykorzystano skrypt w języku programowania C#.

Bodźce wzrokowe przygotowano w taki sposób by obiekty otaczające turbinę wiatrową (drzewa) zastaniały ją na 3 sposoby:

1. turbina prawie niewidoczna, poza końcówkami kręcącego się śmigła (wariant *TIP*),
2. turbina widoczna powyżej gondoli (wariant *HUB*) oraz
3. turbina całkowicie widoczna poza dolną częścią wieży (wariant *TOWER*).

Koncepcję stopni zastonięcia turbiny wiatrowej prezentuje Rys. 15-2, zaś realizację z eksperymentów Rys. 15-3. Inspiracją do takich stopni zastonięcia turbiny wiatrowej była publikacja [158].

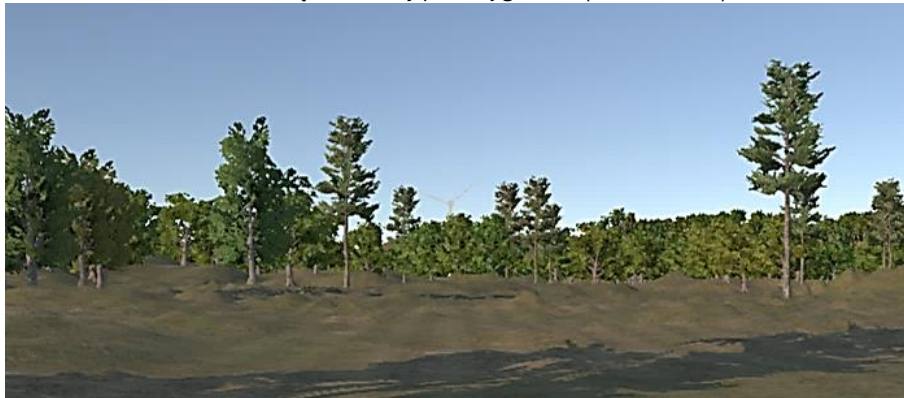


Rys. 15-2 Stopień zastonięcia turbiny wiatrowej w eksperymencie 3.: 1-zastonięcie większości turbiny (*TIP*), widoczne końcówki kręcącego się śmigła; 2-zastonięcie turbiny poniżej gondoli (*HUB*); 3-zastonięcie dolnej części wieży (*TOWER*).

1 – zastonięcie większości turbiny, widoczne końcówki kręcącego się śmigła (wariant *TIP*)



2 – zastonięcie turbiny poniżej gondoli (wariant *HUB*)



3 – zastonięcie dolnej części wieży (wariant *TOWER*)



Rys. 15-3 Przykłady zastonięcia turbiny wiatrowej w eksperymentach przeprowadzonych w wirtualnej rzeczywistości.

Turbina wiatrowa była prezentowana w 3 odległościach: 500 m, 750 m oraz 1000 m. Odległości korespondowały z przygotowanymi bodźcami słuchowymi. Przykłady prezentacji turbiny wiatrowej w różnych odległościach w wirtualnej rzeczywistości przedstawiają Rys. 15-4 - Rys. 15-6.



Rys. 15-4 Bodziec wizualny przedstawiający turbinę wiatrową w odległości 500 m od punktu obserwacji.



Rys. 15-5 Bodziec wizualny przedstawiający turbinę wiatrową w odległości 750 m od punktu obserwacji.



Rys. 15-6 Bodziec wizualny przedstawiający turbinę wiatrową w odległości 1000 m od punktu obserwacji.

Łącząc obie opisane cechy prezentacji turbiny wiatrowej uzyskano 9 różnych rodzajów bodźców wzrokowych. Bodźce stanowiły kombinację stopnia zastonięcia turbiny z odległością w której ją prezentowano. Każdy rodzaj bodźca wzrokowego posiadał 3 różne warianty odpowiadające stopniowi zastonięcia. Charakterystykę bodźców wzrokowych przedstawia Tab. 15-2.

Tab. 15-2 Charakterystyka bodźców wzrokowych.

Stopień zastonięcia	Opis	Odległość prezentowanej turbiny od obserwatora
TIP	Turbina wiatrowa zastonięta przez drzewa w ok. 95%, dla każdej odległości	500
		750
		1000
HUB	Turbina wiatrowa zastonięta przez drzewa w ok. 50%, dla każdej odległości	500
		750
		1000
TOWER	Turbina wiatrowa zastonięta przez drzewa w ok. 15%, dla każdej odległości	500
		750
		1000

15.2. Aparatura

W eksperymencie 3. wykorzystano dwa typy aparatury: do rekonstrukcji bodźców słuchowych oraz do prezentacji bodźców wzrokowych. Za prezentację bodźców słuchowych odpowiadały słuchawki otwarte firmy Sennheiser, typ HD 600 o płaskiej charakterystyce częstotliwościowej (Rys. 15-7). Prezentacja bodźców wizualnych w środowisku VR odbywała się w goglach VR firmy META, typ OCULUS Quest 2 o rozdzielności 1832 x 1920 na okular (Rys. 15-8).



Rys. 15-7 Słuchawki otwarte Sennheiser HD 600.
Ilustracja pochodzi ze strony <https://sennheiser.pl/>



Rys. 15-8 Gogle VR Meta OCULUS Quest 2 z kontrolerami. Ilustracja pochodzi ze strony <https://www.meta.com/>

Gogle OCULUS Quest 2 stanowią autonomiczne urządzenie, które może uruchamiać eksperyment na wbudowanym procesorze. Urządzenie wyposażono w kontroler, którym badani obsługiwali eksperyment. Ze względów higienicznych, każdemu korzystającemu z gogli zakładano jednorazową, indywidualną maskę ochronną. Między eksperymentami miękkie

wyszciania mające kontakt ze skórą były przecierane środkiem bakteriobójczym na bazie alkoholu.

Wykorzystana aparatura umożliwiła przeprowadzenie eksperymentu w dowolnym miejscu, jednakże racji wykorzystania otwartych słuchawek Sennheiser HD600, zadbane o to, by tło akustyczne nie wpływało na wynik badania. Eksperyment przeprowadzano w zamkniętym pomieszczeniu biurowym w Katedrze Akustyki UAM.

15.3. Trening słuchaczy

Do oceny dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych prezentowanego w środowisku wirtualnej rzeczywistości, posługiwano się 11-stopniową ustandaryzowaną skalą oceny dokuczliwości wg IC BEN [115] (patrz: rozdz. 7.1.1) Ze względu na to, że skala IC BEN służy do oceny dźwięków, a nie bodźców audiowizualnych, przed rozpoczęciem eksperymentu etapu II przeprowadzano tzw. trening słuchacza - procedurę zapoznawania słuchaczy z ocenianiem dźwięków wg skali IC BEN. Celem było zwrócenie uwagi badanych na fakt, że ocena dokuczliwości ma dotyczyć usłyszanego hałasu, a nie czynników wizualnych. Zadaniem bodźców wzrokowych jest nadanie pełnego kontekstu prezentowanym bodźcom.

Trening słuchacza opierał się na prezentacji 7 kilkusekundowych bodźców treningowych, które były wykorzystane we wcześniejszych badaniach dokuczliwości hałasu [159] i określono dla nich średnią wartość dokuczliwości wg IC BEN. Bodźce zostały udostępnione do badań dzięki uprzejmości Autorów. Bodźce treningowe prezentowały hałas takich źródeł jak: rondo, ulica o małym i dużym natężeniu, deptak, bazar, park oraz park przy ulicy. Po prezentacji każdego bodźca badani byli informowani o źródle, którego nagrania wystuchali oraz jaką średnią ocenę dokuczliwości wyznaczone dla tego źródła we wcześniejszych badaniach.

Następnie osoby badane miały za zadanie samodzielnie ocenić dokuczliwość hałasu 5 bodźców testowych prezentujących HTW. Informację o źródle dźwięku słuchacze uzyskiwali dopiero po ocenieniu wszystkich bodźców testowych. Poniżej znajduje się instrukcja, którą przekazywano słuchaczom przed przystąpieniem do samodzielnej oceny dokuczliwości dźwięków:

Przed chwilą zostały Pani/Panu zaprezentowane nagrania wraz z ich średnią oceną dokuczliwości. Teraz zaprezentujemy kolejnych pięć nagrań, tym razem jednak prosimy aby samodzielnie Pani/Pan ocenił(a) ich dokuczliwość. Proszę ocenić na skali liczbowej od 0 do 10 jak bardzo dany dźwięk przeszkadzał, irytował lub dokuczał. Jeśli nie dokuczał Pani/Panu wcale proszę wybrać 0, jeśli dokuczał skrajnie, proszę wybrać 10, jeśli dokuczał w sposób „pomiędzy”, proszę wybrać liczbę pomiędzy 0 i 10.

W Tab. 15-3 przedstawiono charakterystykę bodźców wykorzystanych do treningu słuchaczy. Kolejność prezentacji bodźców treningowych i testowych była losowa.

Tab. 15-3 Charakterystyka bodźców wykorzystanych w treningu słuchaczy. Bodźce pochodziły z badania [159], dzięki uprzejmości Autorów

Rodzaj bodźca	Źródło	Poziom dźwięku [dBA]	Średnia ocena dokuczliwości
Treningowy	Rondo	63.0	7
	Ulica o małym natężeniu ruchu pojazdów	55.0	4 – 5
	Ulica o dużym natężeniu ruchu pojazdów	74.0	9
	Bazar	47.0	3 – 4
	Deptak	59.0	5 – 6
	Park	40.0	0 – 1
	Park przy ulicy	50.0	4 - 5
Testowy	Turbina wiatrowa	45.0	Do oceny przez osobę badaną
		50.0	
		55.0	
		60.0	
		65.0	

15.4. Kryteria doboru uczestników eksperymentu

Do Etapu II zgłosiło się 20 chętnych osób. Kryterium udziału w badaniach był prawidłowy słuch, który sprawdzano u każdej osoby badanej przed rozpoczęciem eksperymentu. Badanie audiometrii tonalnej przeprowadzono dla częstotliwości 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz oraz 8000 Hz korzystając z audiometru Interacoustics AC40. Wśród zgłoszonych osób nie stwierdzono podwyższenia progów słyszenia powyżej 25 dB HL.

Liczbę słuchaczy niezbędnych do wykazania statystycznie istotnych różnic obliczono wykorzystując Test F ANOVA dla pomiarów powtarzanych i czynnikach wewnątrzgrupowych. Przy założeniu mocy statystycznej $(1 - \beta) = 80\%$, poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wielkości efektu $(f) = 0,25$ i błędu II rodzaju $\beta = 0,2$ wymagana liczba słuchaczy wnosi 15 osób. Liczba zgłoszonych słuchaczy (20 osób) przekłada się na 94,0% moc statystyczną eksperymentu.

Wiek badanych mieścił się w przedziale od 20 do 52 lat, ze średnią wynoszącą 22 lata. Po zakończeniu eksperymentu badani otrzymywali wynagrodzenie finansowe.

15.5. Metoda badawcza

Do określenia dokuczliwości *HTW* wykorzystano 11-stopniową ustandaryzowaną skalę oceny dokuczliwości wg IC BEN (Rozdz. 7.1.1), którą wcześniej prezentowano badanym podczas tzw. treningu (patrz: rozdział 15.3).

Eksperyment polegał na prezentacji bodźców audiowizualnych i ocenie ich dokuczliwości. Po każdej prezentacji badani mieli za zadanie ocenić dokuczliwość *HTW* na 11-stopniowej skali wg IC BEN.

Na każdym etapie eksperymentu podkreślano, że ocena dokuczliwości ma dotyczyć jedynie prezentowanego *HTW*. Celem badania był wpływ bodźców wzrokowych na ocenę dokuczliwości

hałasu, a nie na ogólne wrażenia ze obejrzonej sceny. Bodźce wzrokowe pozbawiono występujących w nich dźwięków (np. szum trawy, liści drzew itp.) by nie ingerowały w bodźce słuchowe.

Procedura eksperymentu prezentowała się w następujący sposób:

- 1) Badani wypełniali kwestionariusz osobowy i podpisywali zgodę na udział w badaniu. Przeprowadzano badania słuchu (patrz: rozdział 15.4). Badani podpisywali oświadczenie, że nie mają żadnych medycznych przeciwwskazań do udziału w eksperymencie z wykorzystaniem gogli VR. Badanych informowano, że w dowolnym momencie, bez podania przyczyny, mogą wycofać swój udział w eksperymencie.
- 2) Badani zajmowali miejsce w pomieszczeniu odsluchowym, a osoba przeprowadzająca eksperyment pomagała im założyć gogle VR oraz słuchawki.
- 3) Po zadeklarowaniu przez osobę badaną gotowości, uruchamiano eksperyment, który automatycznie prowadził osobę badaną przez kolejne etapy.
- 4) W środowisku VR wyświetlał się ekran powitalny z instrukcją postępowania (widoczny na Rys. 15-1).
- 5) Po zapoznaniu się z instrukcją osoba badana trafiała do „pokoju ocen” czyli sceny, w której ćwiczyła postugiwanie się ustandaryzowaną skalą oceny dokuczliwości wg IC BEN za pomocą wirtualnego suwaka ustawianego za pomocą kontrolera. Interfejs służący do oceny dokuczliwości w „pokoju ocen” prezentuje Rys. 15-9.



Rys. 15-9 Interfejs służący do oceny dokuczliwości wg skali IC BEN.

- 6) Po kliknięciu przycisku „Potwierdź” eksperyment się rozpoczynał.
- 7) Osobie badanej prezentowano losowo wybrany bodziec audiowizualny. Środowisko VR umożliwiało swobodne rozglądanie się po całej przedstawionej scenarii.
- 8) Po upływie 30 sekund, osoba badana była przenoszona wewnątrz eksperymentu do „pokoju ocen”. Jej zadaniem było tam ocenienie dokuczliwości *HTW*, który słyszała

w zaprezentowanej scenie. Pętla eksperymentu zatrzymywała się dopóki nie udzielono odpowiedzi.

- 9) Po wprowadzeniu oceny dokuczliwości skrypt sterujący przebiegiem eksperymentu prezentował kolejny, losowo wybrany bodziec audiowizualny. Po każdej prezentacji bodźca audiowizualnego badany był proszony o ocenę dokuczliwości.
- 10) Krok 9) powtarzał się do momentu zaprezentowania wszystkich bodźców audiowizualnych i ocenie dokuczliwości *HTW* po każdym z nich. Następnie badany trafiał do ostatniej sceny z tablicą z podziękowaniami za udział w badaniu.
- 11) Osoba przeprowadzająca eksperyment pomagała zdjąć osobie badanej gogle VR i wręczał jej wynagrodzenie za udział w badaniu.

Bodźce słuchowe, podczas ruchu głową przez osobę badaną, były automatycznie modyfikowane przez program. Wykorzystano do tego wtyczkę Unity Audio Spatializer SDK z implementacją funkcji przeniesienia głowy (*HRTF - head-related transfer function*) z ustandaryzowanej sztucznej głowy firmy GRAS, typ 45BB KEMAR [160]. Praca wtyczki wpływała na międzyuszną różnicę poziomów prezentowanych bodźców słuchowych, która zgodnie z zasadami binauralnej percepcji dźwięków, pozwalała na lokalizację źródła dźwięku [57].

16. Etap III: Ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych w warunkach kontrolowanych

W niniejszym rozdziale opisano najważniejsze założenia eksperymentu poświęconego weryfikacji hipotezy H3: *Obiektywna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych*. Celem eksperymentu było określenie rzeczywistej dokuczliwości HTW pozbawionej wpływu czynników pozaakustycznych. Metodologia, przegląd literatury, wyniki i rozszerzona dyskusja zostały szczegółowo opisane w artykule **Rościszewska A., Buszkiewicz, M.J., Dobrzynska-Kobylec, G., i in. 2025. Cognitive neuroscience approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions. Humanities & Social Sciences Communications** [161]. Publikacja stanowi element niniejszej rozprawy i została w całości zamieszczona w Załączniku 1.

W przeprowadzonym eksperymencie do oceny dokuczliwości hałasu, oprócz skali ICIBEN, wykorzystano wyniki testów zdolności poznawczych przeprowadzonych w warunkach ekspozycji na hałas. Zastosowanymi wskaźnikami były wyniki testu MaRs-IB (ang. *Matrix Reasoning Item Bank*), określające czas reakcji; SART (ang. *Sustained Attention to Response Task*) odpowiadające za zdolność do utrzymania uwagi oraz skala DASS (ang. *Depression Anxiety Stress Scale*), związana z oceną odczuwania stresu lub niepokoju w reakcji na prezentowane bodźce.

Zastosowana metoda nie wymaga od osoby badanej świadomego podejmowania decyzji na temat dokuczliwości hałasu. Główny nacisk w eksperymencie był kładziony na wykonywanie zadań umysłowych, dlatego badani nie skupiali się na odstuchiwaniu HTW lub HD. Uczestnicy badania nie byli informowani o źródle hałasu, którego słuchają. Wpływ czynników indywidualnych takich jak: znajomość źródła hałasu, nastawienie do technologii wiatrowej i inne czynniki pozaakustyczne (widoczność źródła, czerpanie korzyści finansowych) został wyeliminowany.

16.1. Bodźce akustyczne

W eksperymencie wykorzystano dwa rodzaje bodźców: hałas pochodzący od pojedynczej turbiny wiatrowej (HTW) i hałas drogowy (HD). Bodźce akustyczne zostały przygotowane na podstawie nagrań przeprowadzonych podczas pomiarów akustycznych. Nagrania HTW przeprowadzono w Lokalizacji 2. (patrz: rozdział 13.1.2) podczas kampanii pomiarowej zorganizowanej w ramach projektu HETMAN. Punkt pomiarowy znajdował się w odległości 500 m od TW. Nagrania HD zrealizowano przy autostradzie A2 w pobliżu Poznania (patrz: rozdział 13.2) w odległości 500 m od skraju pasa ruchu. Wybrano niezakłócone fragmenty, trwające 7 minut i 15 minut odpowiednio dla nagrań HTW i HD. Następnie nagrania zapętlono tworząc ok. 1-godzinne ścieżki dźwiękowe odtwarzane badanym podczas eksperymentu.

Równoważne poziomy dźwięku odpowiadające wykorzystanym fragmentom przedstawiono w Tab. 16-1. Poziom całkowity nagrania HD został zrównany do poziomu całkowitego nagrań

HTW stosując jednakowe wzmocnienie we wszystkich pasmach. Równą gęstość widmową w nagraniach obu źródeł osiągnięto poprzez zrównanie poziomów według wartości nieważonych krzywą korekcyjną A – czyli dB SPL. Było to podyktowane silnym komponentem niskoczęstotliwościowym w widmie sygnału *HTW*, przez który różnice równoważnych poziomów dźwięku w dBA były znaczące. Zrównanie nagrań względem poziomów dźwięku ważonych krzywą korekcyjną A skutkowało nienaturalnym wrażeniem przy odtwarzaniu nagrań – zbyt głośnej *TW* i zbyt cichego *HD*.

Tab. 16-1 Równoważne poziomy dźwięku nagrań i bodźców wykorzystanych w eksperymencie 4.

Źródło hałasu	Równoważne poziomy nagrań o zrównanych poziomach dźwięku	
	L_{Aeq} [dBA]	L_{eq} [dB]
Turbina wiatrowa	38.2	65.4
Autostrada A2	56.8	65.4

Widma tercjowe wykorzystanych bodźców akustycznych w dB SPL i dBA przedstawiono na **Fig. 2a** w Załączniku 1. Równoważne poziomy prezentowanych nagrań kontrolowano miernikiem poziomu dźwięku SVAN 979 z mikrofonem umieszczonym w lokalizacji głowy osoby badanej.

16.2. Aparatura

Aparatura wykorzystana do nagrań i prezentacji nagrań *HTW* i *HD* została opisana w sekcji **Acoustic conditions** w Załączniku 1. Rozmieszczenie głośników odtwarzających przygotowane nagrania przedstawia **Fig. 2b** w Załączniku 1.

16.3. Kryteria doboru uczestników eksperymentu

W eksperymencie zaplanowano przebadanie 3 grup słuchaczy. Liczbę słuchaczy wymaganą do wykazania statystycznie istotnych różnic wewnątrzgrupowych oraz międzygrupowych obliczono przeprowadzając dwuczynnikową analizę wariancji z powtarzaniem pomiarów (2 x 3 ANOVA). Przy założeniu mocy statystycznej $(1 - \beta) = 80\%$, poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wielkości efektu (f) = 0,25 i błędzie II rodzaju $\beta = 0,2$ wymagana liczba słuchaczy wnosi 42 osoby. Do eksperymentów zgłosiło się 45 osób, zatem grupy badawcze składały się z 15 osób każda.

Wszyscy słuchacze mieli sprawdzony słuch. Przeprowadzono badanie audiometrii tonalnej dla częstotliwości 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz oraz 8000 Hz, pomiar otoemisji akustycznej produktów zniekształceń nieliniowych (DPOAE) oraz badanie tympanometryczne [162]. Progi słyszenia wszystkich zgłoszonych osób nie przekraczały 25 dB HL w żadnej częstotliwości. Stosunek sygnału do szumu otoemisji DPOAE wynosił średnio 21 dB SPL. Uzyskane tympanogramy w przypadku każdego badanego miały kształt krzywej typu A, świadczący o zdrowym narządzie słuchu.

16.4. Metoda badawcza

Eksperyment składał się z kilku etapów. Podczas pierwszego etapu badaniu wypełniali kwestionariusz osobowy, zgodę na udział w badaniach, kwestionariusz ruminacji⁵-refleksyjności *Rumination-Reflection Questionnaire* [163]) oraz udzielali odpowiedzi w teście tolerancji-nietolerancji dwuznaczności (TOA – *Tolerance of Ambiguity Scale*).

Drugi etap eksperymentu odbywał się w laboratorium Centrum Neuronauki Poznawczej na Wydziale Fizyki i Astronomii UAM. Najpierw badani relaksowali przez 10 minut się czytając artykuły. Następnie przechodzili do osobnego pomieszczenia, w którym zakładano im elektrody elektroencefalografu i analizowano dynamikę wskaźnika TBR (ang. *Theta/Beta Ratio*⁶) będącego markerem uwagi i aktywności poznawczej mózgu. Dalej badanych poddawano testom SART [164] (*Sustained Attention to Response Task* – Test Uwagi Trwałej⁷) i MaRs-IB [165] (*Matrix Reasoning Item Bank* – Bank Zadań Macierzowych⁸). Badani wykonywali zadania w ciszy. Ten etap trwał około 30 minut.

Następnie badani wracali do pokoju odpoczynku, relaksowali się i po 10 minutach wracali do pokoju testowego. W trzecim etapie ponownie prowadzono pomiar wskaźnika TBR przy pomocy EEG w trakcie wykonywania przez słuchaczy testów zdolności poznawczych (SART i MaRs-IB). Tym razem badani byli losowo przydzielani do grupy eksponowanej na: (1) *HTW*, (2) *HD* lub (3) brak bodźców akustycznych – ciszę. Ten etap również trwał około 30 minut.

Po dwukrotnym przeprowadzeniu testów poznawczych badani przechodzili do pomieszczenia, w którym badano słuch (audiometria tonalna i tympanometria). Tam też badani oceniali dokuczliwość dźwięków wg skali ICBEN (patrz: rozdział 7.1.1), na które byli eksponowani w trzecim etapie eksperymentu oraz wypełniali kwestionariusz DASS [166] (*Depression, Anxiety and Stress Scale*⁹).

Szczegółowy opis każdego testu znajduje się w sekcji **Procedure** w Załączniku 1. Schemat przedstawiający procedurę przeprowadzania eksperymentu przedstawia **Fig 1.** w Załączniku 1.

⁵ Ruminacje: uporczywe myśli, wątpliwości

⁶ TBR: stosunek aktywności fal theta (4-7 Hz) do fal beta (13-30 Hz), określający stopień skupienia badanego

⁷ SART: test neuropsychologiczny zaprojektowany do pomiaru uwagi trwałej, kontroli poznawczej i hamowania reakcji

⁸ MaRs-IB: standaryzowany test psychometryczny służący do oceny rozumowania niewerbalnego i zdolności poznawczych, rozumowania przez analogię, rozpoznawania wzorców i dedukcji logicznej.

⁹ DASS: samoopisowy kwestionariusz służący do oceny trzech kluczowych wymiarów stanu emocjonalnego: depresji (Depression), lęku (Anxiety), stresu (Stress).

V Wyniki badań

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów. Wyniki podzielono zgodnie z etapami badań korespondujących z hipotezami badawczymi (patrz: Tab. 12-1). Omówienie, analiza i dyskusja wyników znajduje się w kolejnych sekcjach.

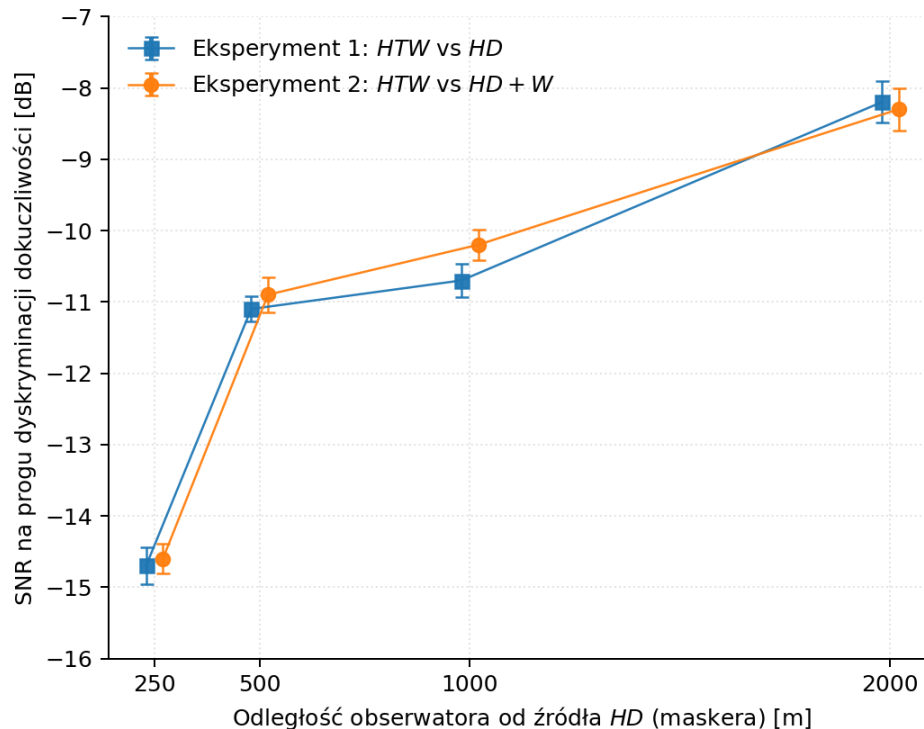
We wszystkich eksperymentach przyjęto istotność wyników na poziomie $p < 0.001$.

17. Etap I - wyniki eksperymentów 1 i 2: wpływ hałasu autostrady (i wiatru) na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

Etap I obejmował dwa eksperymenty:

- wpływ hałasu autostrady na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych,
- wpływ hałasu autostrady i wiatru na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

Ostatecznym wynikiem przeprowadzonych eksperymentów był próg różnicowania (dyskryminacji) dokuczliwości *HTW* na tle *HD* w danej odległości w postaci wartości SNR. Średnie progi dyskryminacji dokuczliwości dla obu eksperymentów przedstawia Rys. 17-1. Zestawienie wartości SNR wyznaczonych w eksperymencie 1 i eksperymencie 2 przedstawiono w Tab. 17-1. W Tab. 17-2 i Tab. 17-3 przedstawiono wyniki analizy ANOVA i analizy post-hoc Tukey'a dla uzyskanych wyników.



Rys. 17-1 Wyniki eksperymentów etapu I - Średnie wartości SNR na progu dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych w zależności od odległości obserwatora od drogi (maskera). Pionowe słupki oznaczają 95% przedziały ufności.

Tab. 17-1 Wyniki eksperymentów etapu I - średnie wartości SNR na progu detekcji dokuczliwości HTW w zależności od odległości obserwatora od bodźców maskujących (HD) oraz obecności bodźców wiatru w prezentowanych próbkach

Numer eksperymentu	Bodźce hałasu wiatru w prezentowanych próbkach? (<i>wind</i>)	Część eksperymentu	Odległość odpowiadająca prezentacji bodźca HD (<i>masker</i>) [m]	Wyznaczona granica dyskryminacji bodźca HTW na tle maskera HD [m]	Odchylenie standardowe wartości granicznej dyskryminacji bodźca HTW [m]	Poziomy dźwięku bodźców maskera [dBA]	Poziom próbek odpowiadających granicy dyskryminacji bodźca HTW [dBA]	SNR na progu dyskryminacji dokuczliwości [dB]
1	nie	1	250	340	312.0	63.1	48.5	-14.7
		2	500	490	566.8	59.5	48.4	-11.1
		3	1000	740	653.8	58.4	47.7	-10.7
		4	2000	1120	226.4	55.1	46.8	-8.2
2	tak	1	250	410	244.4	63.2	48.5	-14.6
		2	500	350	346.6	59.6	48.7	-10.9
		3	1 000	560	464.6	58.5	48.3	-10.2
		4	2 000	1090	299.2	55.2	46.9	-8.3

Tab. 17-2 Wyniki analizy ANOVA dla obu eksperymentów etapu I.

Czynnik	Suma kwadratów	Stopnie swobody (df)	Średni kwadrat	F	p	ω^2
Poziom maskera HD (<i>masker</i>)	1.810×10^7	3	6.035×10^6	33.622	< 0.001	0.312
Obecność bodźca wiatru (<i>wind</i>)	232,316	1	232,316	1.294	0.257	9.376×10^{-4}
<i>masker</i> × <i>wind</i>	494,797	3	164,932	0.919	0.433	>0.999

Uwaga: użyto sum kwadratów typu III (Type III Sum of Squares)

Tab. 17-3 Wyniki testu post-hoc Tukey'a dla czynnika 'masker'

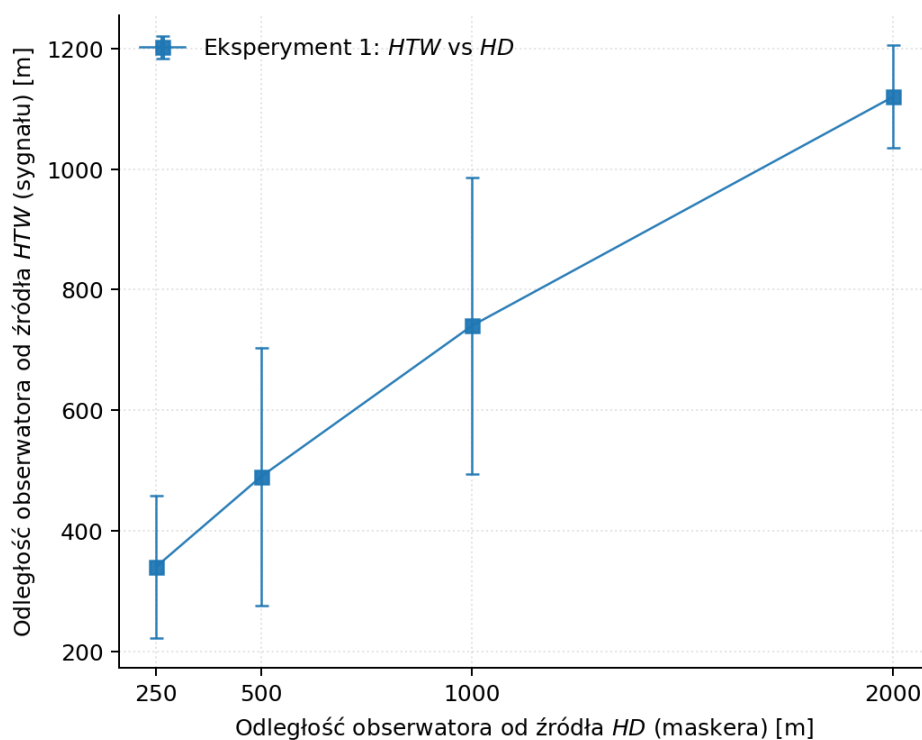
Czynnik: <i>masker</i>		Średnia różnica	Błąd standardowy (SE)	Stopnie swobody (df)	t	p_{tukey}
250	500	-49.31	81.53	208	-0.605	0.93
	1,000	-279.43	81.53	208	-3.427	0.004
	2,000	-732.23	81.53	208	-8.981	< 0.001
500	1,000	-230.12	81.53	208	-2.822	0.027
	2,000	-682.93	81.53	208	-8.376	< 0.001
1,000	2,000	-452.81	81.53	208	-5.554	< 0.001

Uwagi: Wartości *p* skorygowano z uwzględnieniem porównywania rodziny 4 estymat. Wyniki uśredniono po poziomach czynnika: *wind*.

17.1. Wpływ hałasu autostrady na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

W eksperymencie 1. określono próg różnicowania (dyskryminacji) dokuczliwości *HTW* na tle wyłącznie *HD* prezentowanego w czterech odległościach. Częstkowe progi dyskryminacji oraz średnią wartość progu dyskryminacji dla każdej części eksperymentu przedstawia Rys. 17-2.

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej ANOVA przedstawiono w Tab. 17-4. Analiza wykazała, że średnie wartości progu dyskryminacji dokuczliwości *HTW* w poszczególnych częściach eksperymentu istotnie się różnią.



Rys. 17-2 Wyniki eksperymentu 1. - średni próg dyskryminacji dokuczliwości *HTW* na tle bodźców *HD* prezentowanych w różnej odległości. Pionowe słupki oznaczają 95% przedziały ufności.

Tab. 17-4 Wyniki analizy ANOVA. Wpływ odległości prezentacji bodźców maskujących *HD* na próg dyskryminacji dokuczliwości *HTW*.

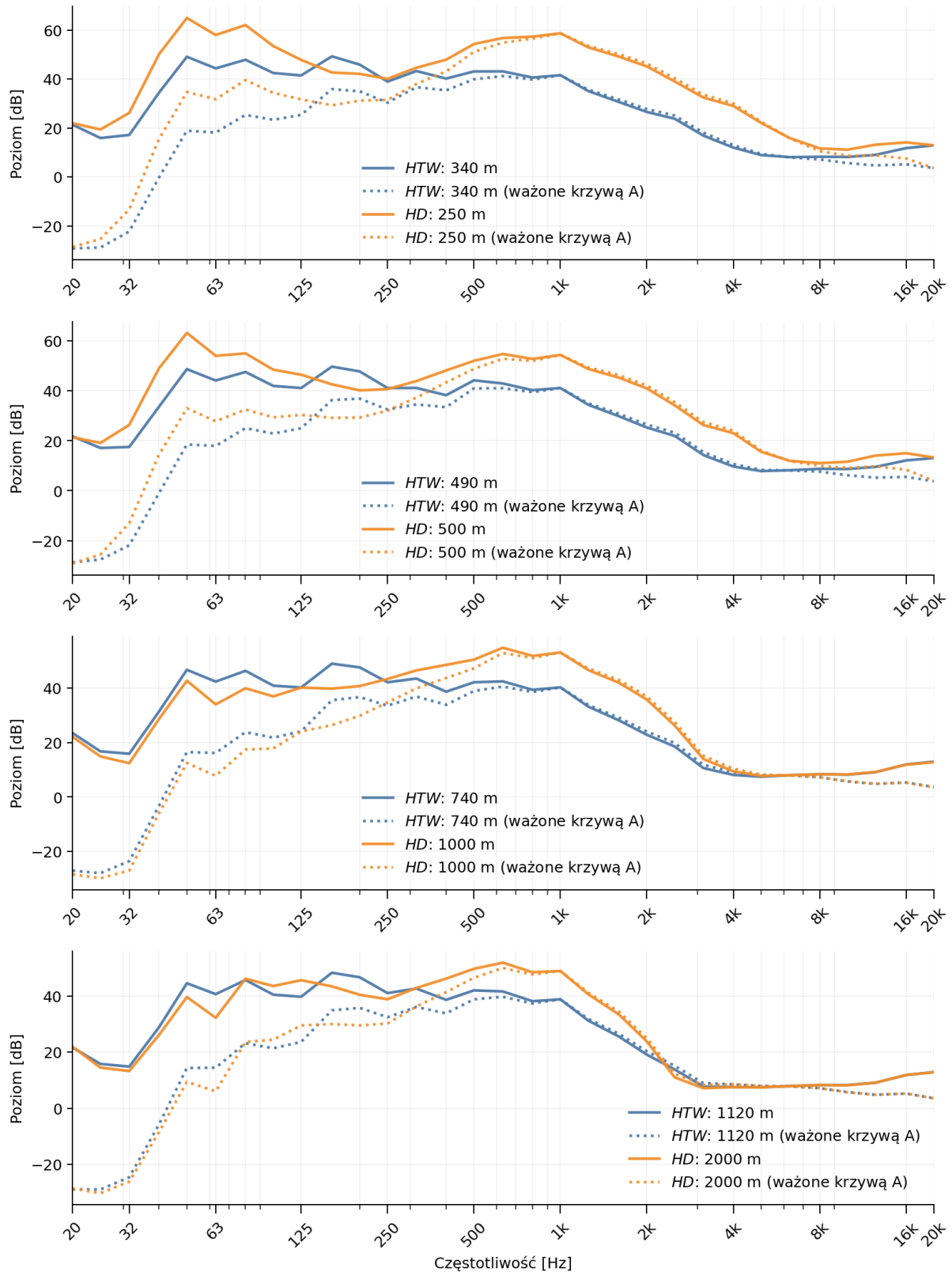
Czynnik	Suma kwadratów	Stopnie swobody (df)	Średni kwadrat	F	p
Poziom maskera <i>HD</i> (<i>masker</i>)	9.41×10^6	3	3.14×10^6	13.46	< 0.001
Uwaga: użyto sum kwadratów typu III (Type III Sum of Squares)					

W oparciu o poziomy hałas bodźców *HTW*, dla których wyznaczono progi dyskryminacji dokuczliwości *HTW*, i poziomy hałas odpowiednich bodźców *HD* (maskera) obliczono wartości SNR. W Tab. 17-5 zamieszczono wartości odległości prezentacji bodźców *HTW* i *HD*, odpowiadające im poziomy hałas i obliczone na ich podstawie SNR.

Tab. 17-5 Wyniki eksperymentu 1. - granice dyskryminacji *HTW* maskowanych bodźcami *HD*.

Część	Odległość odpowiadająca prezentacji bodźca <i>HD</i> [m]	Wyznaczona granica dyskryminacji bodźca <i>HTW</i> na tle maskera <i>HD</i> [m]	Odchylenie standardowe wartości granicznej dyskryminacji bodźca <i>HTW</i> [m]	Poziomy dźwięku bodźców maskera [dBA]	Poziom próbek odpowiadających granicy dyskryminacji bodźca <i>HTW</i> [dBA]	SNR na progu dyskryminacji dokuczliwości [dB]
1	250	340	312.0	63.1	48.5	-14.7
2	500	490	566.8	59.5	48.4	-11.1
3	1000	740	653.8	58.4	47.7	-10.7
4	2000	1120	226.4	55.1	46.8	-8.2

Na Rys. 17-3 przedstawiono widma bodźców *HTW* i widma bodźców *HD* odpowiadające ich odległościom prezentacji dla obliczonych wartości SNR na progu dyskryminacji dokuczliwości *HTW*.



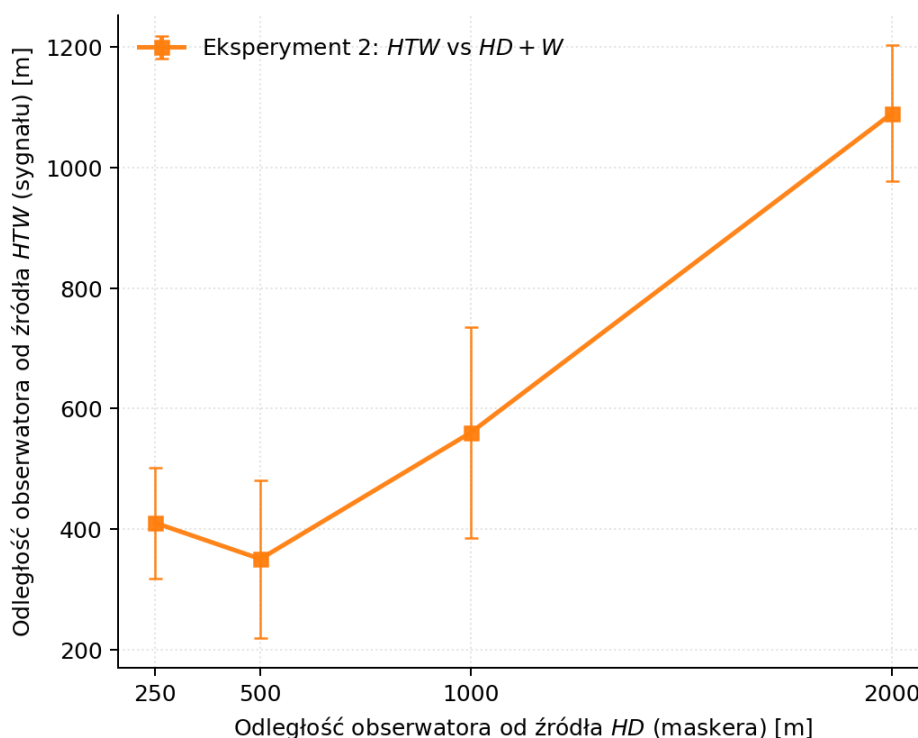
Rys. 17-3 Średnie widma HTW oraz HD dla wyznaczonych progów dyskryminacji HTW na tle maskera HD prezentowanego w ustalonej odległości. Na podstawie wypadkowych poziomów hałasu wyznaczono wartości SNR. Widma wykreślone przerywaną przedstawiają poziomy ważony krzywą korekcyjną A

17.2. Wpływ hałasu autostrady i wiatru na detekcję dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

W eksperymencie 2. określono próg różnicowania (dyskryminacji) dokuczliwości *HTW* na tle bodźców *HD* prezentowanego w czterech odległościach wraz z hałasem wiatru. Częstkowe progi dyskryminacji oraz średnią wartość progu dyskryminacji dla każdej części eksperymentu przedstawia Rys. 17-4.

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej ANOVA przedstawiono w Tab. 17-6. Analiza wykazała, że średnie wartości progu dyskryminacji dokuczliwości *HTW* w poszczególnych częściach eksperymentu istotnie się różnią.

Dokładne wartości wyznaczonych progów dyskryminacji, odpowiadające im odległości prezentacji bodźców i poziomy dźwięku prezentowanych próbek przedstawiono w Rys. 17-4.



Rys. 17-4 Wyniki eksperymentu 2. - Średni próg dyskryminacji dokuczliwości *HTW* na tle bodźców *HD+W* prezentowanych w różnej odległości. Pionowe słupki oznaczają 95% przedziały ufności.

Tab. 17-6 Wyniki analizy ANOVA. Wpływ odległości prezentacji bodźców maskujących *HD+W* na próg dyskryminacji dokuczliwości *HTW*.

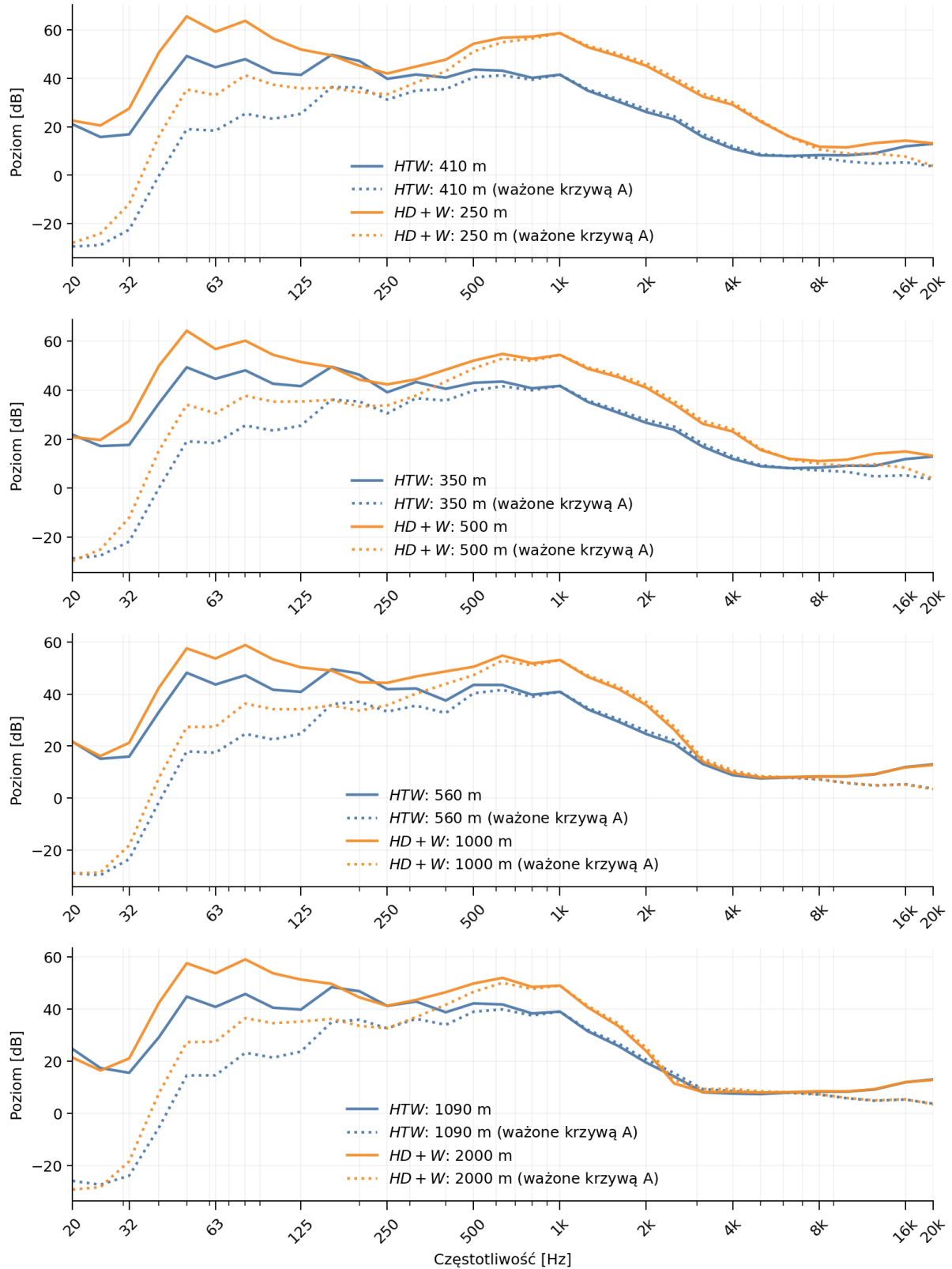
Czynnik	Suma kwadratów	Stopnie swobody (df)	Średni kwadrat	F	p
Poziom maskera <i>HD+W (masker)</i>	9.19×10^6	3	3.06×10^6	24.32	< 0.001

Uwaga: użyto sum kwadratów typu III (Type III Sum of Squares)

Tab. 17-7 Wyniki eksperymentu 2. - granice dyskryminacji HTW maskowanych bodźcami HD+W.

Część	Odległość prezentacji bodźca HD [m]	Wyznaczona granica dyskryminacji bodźca HTW na tle maskera HD+W [m]	Odchylenie standardowe wartości granicznej dyskryminacji bodźca HTW [m]	Poziomy dźwięku bodźców maskera [dBA]	Poziom próbek odpowiadających granicy dyskryminacji bodźca HTW [dBA]	SNR na progu dyskryminacji dokuczliwości [dB]
1	250	410	244.4	63.2	48.5	-14.6
2	500	350	346.6	59.6	48.7	-10.9
3	1000	560	464.6	58.5	48.3	-10.2
4	2000	1 090	299.2	55.2	46.9	-8.3

Na Rys. 17-3 przedstawiono widma HTW i widma HD odpowiadające ich odległościom prezentacji dla obliczonych wartości SNR na progu dyskryminacji dokuczliwości. Widma wykreślone przerywaną linią odnoszą się do dźwięków ważonych krzywą korekcyjną A.



Rys. 17-5 Średnie widma HTW oraz HD+W dla wyznaczonych progów dyskryminacji HTW na tle maskera HD+W prezentowanego w ustalonej odległości. Na podstawie wypadkowych poziomów hałasu wyznaczono wartości SNR. Widma wykreślone przerywaną przedstawiają poziomy ważony krzywą korekcyjną A

17.3. Ocena dokuczliwości hałasu

Średnie oceny dokuczliwości bodźców *HTW* prezentowanych w eksperymencie 1. i eksperymencie 2. przedstawia Tab. 17-8.

Tab. 17-8 Średnie oceny dokuczliwości *HTW* dla każdej części eksperymentów etapu I.

Odległość odpowiadająca prezentacji maskera <i>HD</i>	obecność bodźca wiatru	N	Średnia dokuczliwość	Odchylenie standardowe dokuczliwości (SD)	Błąd standardowy dokuczliwości (SE)	Współczynnik zmienności dokuczliwości	Przedział ufności 95% (dolny; górny)
250	nie	27	5.65	2.06	0.40	0.36	4.88; 6.43
	tak	27	5.52	2.28	0.44	0.41	4.66; 6.38
500	nie	27	5.39	2.00	0.39	0.37	4.63; 6.14
	tak	27	5.30	2.11	0.41	0.40	4.5; 6.09
1000	nie	27	4.65	1.98	0.39	0.43	3.91; 5.4
	tak	27	5.19	2.32	0.45	0.45	4.31; 6.06
2000	nie	27	4.92	2.02	0.40	0.41	4.16; 5.68
	tak	27	5.37	2.12	0.41	0.39	4.57; 6.17

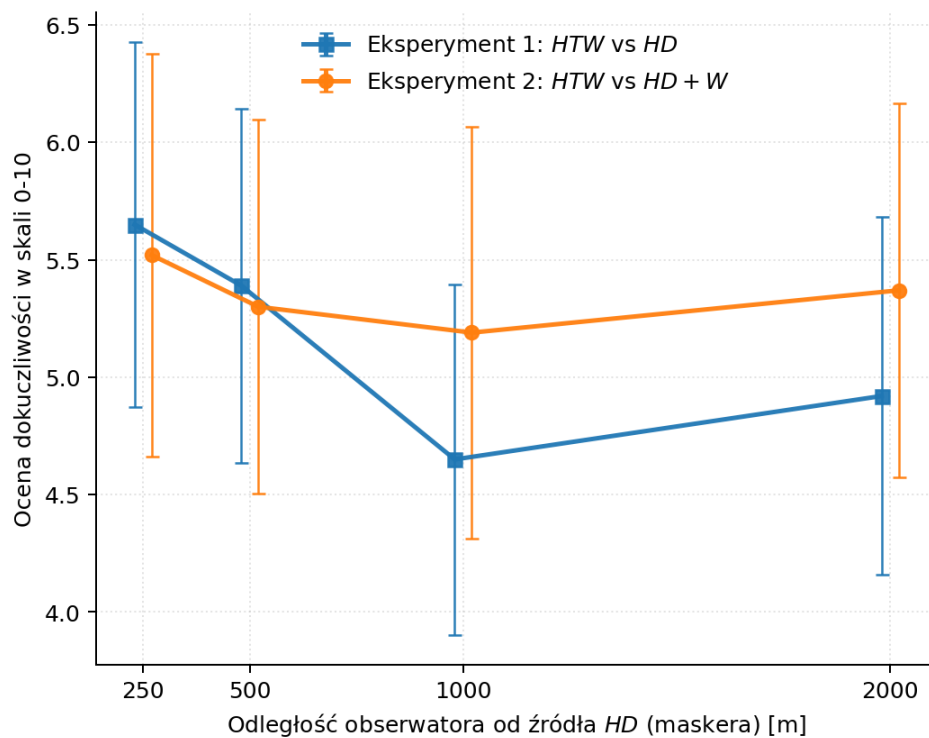
W Tab. 17-9 przedstawiono analizę ANOVA wpływu odległości maskera oraz obecności wiatru na oceny dokuczliwości. Wyniki wskazują, że oba czynniki nie są istotne statystycznie przy ocenie dokuczliwości *HTW*.

Tab. 17-9 Wyniki analizy mieszanego modelu liniowego ANOVA. Wpływ bodźców maskujących na ocenę dokuczliwości *HTW*.

Czynnik	Suma kwadratów	Stopnie swobody (df)	Średni kwadrat	F	p
Poziom maskera <i>HD</i> (<i>masker</i>)	12.77	3	4.26	0.95	0.42
Obecność wiatru (<i>wiatr</i>)	1.89	1	1.89	0.42	0.52
<i>masker</i> × <i>wiatr</i>	4.85	3	1.62	0.36	0.78

Uwaga: użyto sum kwadratów typu III (Type III Sum of Squares)

Średnie wartości dokuczliwości wyznaczone dla każdej części eksperymentów 1. i 2. wraz z 95% przedziałem ufności przedstawiono odpowiednio na Rys. 17-6.



Rys. 17-6 Średnia dokuczliwość bodźców HTW oceniona dla każdej części eksperymentu 1. i 2. Pionowe słupki oznaczają 95% przedziały ufności.

18. Etap II - wyniki eksperymentu 3: udział czynników wzrokowych w ocenie dokuczliwości hałasu turbiny wiatrowej

Wyniki eksperymentu 3. wykorzystującego bodźce audiowizualne do oceny wpływu zastonięcia *TW* zamieszczono poniżej.

Przeprowadzono analizę wariancji ANOVA, której wyniki przedstawia Tab. 18-1. Analiza wykazała istotny główny efekt odległości od źródła hałasu jest istotny statystycznie wskazując na wzrost ocen dokuczliwości wraz ze zmniejszaniem odległości od *TW*.

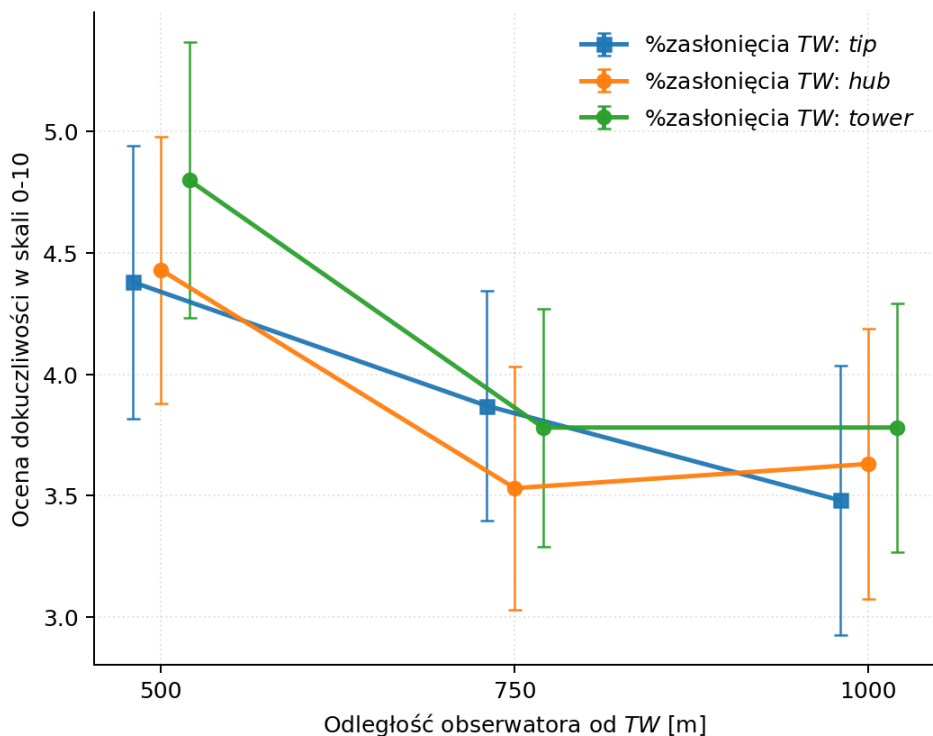
Efekt widoczności źródła nie był istotny statystycznie. Nie stwierdzono również istotnej interakcji odległości i widoczności, co sugeruje, że wpływ odległości na ocenę dokuczliwości był niezależny od tego, w jakim stopniu źródło było widoczne.

Tab. 18-1 Wyniki eksperymentu 3: udział czynników wzrokowych w ocenie dokuczliwości HTW – Analiza statystyczna wyników oceny dokuczliwości HTW w sytuacjach różnego zastonięcia turbiny wiatrowej przez drzewa.

Czynnik	Suma kwadratów	Stopnie swobody (df)	Średni kwadrat	F	p
% zastonięcia	6.71	2	3.36	0.76	0.47
poziom HTW (odległość <i>TW</i> od słuchacza)	89.21	2	44.61	10.12	< 0.001
% zastonięcia × poziom HTW	5.81	4	1.45	0.33	0.86

Uwaga: użyto sum kwadratów typu III (Type III Sum of Squares)

Poniżej Rys. 18-1 przedstawia średnie oceny dokuczliwości w formie wykresów. Pionowe linie odpowiadają przedziałom ufności równym 95%. Dokładne wartości średnich ocen dokuczliwości dla wpływu widoczności *TW* i odległości od *TW* przedstawia Tab. 18-2. Interakcje między czynnikami (testy post-hoc Tukey'a) przedstawiono w Tab. 18-3 Tab. 18-4.



Rys. 18-1 Wyniki eksperymentu 3 – wpływ stopnia zastonięcia i odległości TW od słuchacza na ocenę dokuczliwości.

Tab. 18-2 Średnie oceny dokuczliwości HTW uzyskane w eksperymencie 3.

% zastonięcia	Odległość odpowiadająca TW od punktu obserwacji	N	Średnia dokuczliwość	Odchylenie standardowe dokuczliwości (SD)	Błąd standardowy dokuczliwości (SE)	Współczynnik zmienności dokuczliwości	Przedział ufności 95% (dolny; górny)
tip	500	60	4.38	2.23	0.29	0.51	3.82; 4.95
	750	60	3.87	1.87	0.24	0.48	3.39; 4.34
	1000	60	3.48	2.19	0.28	0.63	2.93; 4.04
hub	500	60	4.43	2.17	0.28	0.49	3.88; 4.98
	750	60	3.53	1.98	0.26	0.56	3.03; 4.03
	1000	60	3.63	2.20	0.28	0.61	3.08; 4.19
tower	500	60	4.80	2.25	0.29	0.47	4.23; 5.37
	750	60	3.78	1.94	0.25	0.51	3.29; 4.27
	1000	60	3.78	2.03	0.26	0.54	3.27; 4.30

Tab. 18-3 Wyniki testu post-hoc Tukey'a dla czynnika 'odległość'

Czynnik: odległość	Średnia różnica	Przedział ufności 95%		Błąd standardowy (SE)	Stopnie swobody (df)	t	p _{Tukey}	
		Dolny	Górny					
500	750	0.811	0.291	1.331	0.221	531	3.666	< 0.001
	1,000	0.906	0.386	1.426	0.221	531	4.093	< 0.001
750	1,000	0.094	-0.426	0.614	0.221	531	0.427	0.904

Uwaga. Wartości p i przedziały ufności skorygowano z uwzględnieniem porównywania rodziny 3 estymat (przedziały ufności skorygowano metodą Tukeya).
Wyniki uśredniono po poziomach czynnika: % zastonięcia

Tab. 18-4 Wyniki testu post-hoc Tukey'a dla interakcji czynników '% zastonięcia' i 'odległość'

Interakcja czynników: %zastonięcia × odległość		Średnia różnica	Przedział ufności 95%		Błąd standardowy (SE)	Stopnie swobody (df)	t	p _{Tukey}
			Dolny	Górny				
tip 500	hub 500	-0.05	-1.244	1.144	0.383	531	-0.13	>0.999
	tower 500	-0.417	-1.61	0.777	0.383	531	-1.087	0.976
	tip 750	0.517	-0.677	1.71	0.383	531	1.348	0.916
	hub 750	0.85	-0.344	2.044	0.383	531	2.218	0.395
	tower 750	0.6	-0.594	1.794	0.383	531	1.566	0.823
	tip 1000	0.9	-0.294	2.094	0.383	531	2.348	0.315
	hub 1000	0.75	-0.444	1.944	0.383	531	1.957	0.574
	tower 1000	0.6	-0.594	1.794	0.383	531	1.566	0.823
hub 500	tower 500	-0.367	-1.56	0.827	0.383	531	-0.957	0.989
	tip 750	0.567	-0.627	1.76	0.383	531	1.479	0.865
	hub 750	0.9	-0.294	2.094	0.383	531	2.348	0.315
	tower 750	0.65	-0.544	1.844	0.383	531	1.696	0.749
	tip 1000	0.95	-0.244	2.144	0.383	531	2.479	0.245
	hub 1000	0.8	-0.394	1.994	0.383	531	2.087	0.483
	tower 1000	0.65	-0.544	1.844	0.383	531	1.696	0.749
tower 500	tip 750	0.933	-0.26	2.127	0.383	531	2.435	0.267
	hub 750	1.267	0.073	2.46	0.383	531	3.305	0.028
	tower 750	1.017	-0.177	2.21	0.383	531	2.653	0.168
	tip 1000	1.317	0.123	2.51	0.383	531	3.436	0.018
	hub 1000	1.167	-0.027	2.36	0.383	531	3.044	0.061
	tower 1000	1.017	-0.177	2.21	0.383	531	2.653	0.168
tip 750	hub 750	0.333	-0.86	1.527	0.383	531	0.87	0.994
	tower 750	0.083	-1.11	1.277	0.383	531	0.217	>0.999
	tip 1000	0.383	-0.81	1.577	0.383	531	1	0.986
	hub 1000	0.233	-0.96	1.427	0.383	531	0.609	>0.999
	tower 1000	0.083	-1.11	1.277	0.383	531	0.217	>0.999
hub 750	tower 750	-0.25	-1.444	0.944	0.383	531	-0.652	0.999
	tip 1000	0.05	-1.144	1.244	0.383	531	0.13	>0.999
	hub 1000	-0.1	-1.294	1.094	0.383	531	-0.261	>0.999
	tower 1000	-0.25	-1.444	0.944	0.383	531	-0.652	0.999
tower 750	tip 1000	0.3	-0.894	1.494	0.383	531	0.783	0.997
	hub 1000	0.15	-1.044	1.344	0.383	531	0.391	>0.999
	tower 1000	5.516×10 ⁻¹⁶	-1.194	1.194	0.383	531	1.439×10 ⁻¹⁵	>0.999
tip 1000	hub 1000	-0.15	-1.344	1.044	0.383	531	-0.391	>0.999
	tower 1000	-0.3	-1.494	0.894	0.383	531	-0.783	0.997
hub 1000	tower 1000	-0.15	-1.344	1.044	0.383	531	-0.391	>0.999

Uwaga: Wartości p i przedziały ufności skorygowano z uwzględnieniem porównywania rodziny 9 estymat (przedziały ufności skorygowano metodą Tukeya).

19. Etap III - wyniki eksperymentu 4: obiektywna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

Wyniki eksperymentu 4. Przedstawiono w sekcji **Results** w Załączniku 1. W tym rozdziale przedstawiono najważniejsze wyniki z punktu widzenia weryfikacji hipotezy H3.

Analiza wariancji ANOVA (patrz: **Alterations in neural dynamics** w Załączniku 1) nie wykazała istotnych efektów głównych ani interakcji między etapem eksperymentu ani grupą badanych (czyli rodzajem bodźca akustycznego) w odniesieniu do wskaźnika TBR (ang. *Theta/Beta Ratio*). Zaobserwowano nieznaczny wzrost wskaźnika TBR co oznacza pogorszenie funkcji poznawczych z czasem, efekt ten nie był zależny od rodzaju prezentowanego nagrania.

Analizy wyników testów SART i MaRs-IB (patrz: **Effects on cognitive behaviors** w Załączniku 1) nie wykazały istotnych statystycznie różnic między grupami badanych oraz między etapami eksperymentu. Zarówno rodzaj grupy badanej, jak i czas wykonywania testu (przed/po) nie były czynnikami istotnie wpływającymi na wyniki testów.

Średnie wartości oceny dokuczliwości *HTW* i *HD* wg ICBEN wyniosły odpowiednio 2,4 i 1,6 w skali 0-10. Analiza statystyczna (patrz: **Assessment of stress and annoyance levels, and their psychological underpinnings** w Załączniku 1) wskazała że nieznacznie większa dokuczliwość *HTW* nie jest istotna statystycznie.

Analiza kwestionariusza DASS (patrz: **Assessment of stress and annoyance levels, and their psychological underpinnings** w Załączniku 1) pokazała, że nie ma istotnych różnic między grupami w ocenie stresu wywołanego przez *HTW*. *HTW* nie miał wpływu na poziom odczuwanego stresu, lęku i innych negatywnych emocji.

Czynniki indywidualne nie wpływały istotnie na ocenę dokuczliwości lub wyniki testów poznawczych (patrz: **Assessment of stress and annoyance levels, and their psychological underpinnings** w Załączniku 1). Analiza wyników kwestionariusza ruminacji-refleksyjności wykazała, że ruminacyjny sposób myślenia nie wpływa na wyniki testów poznawczych ani na wskaźnik TBR. Analiza kwestionariusza TOA ukazała, że niska tolerancja na niejednoznaczność u badanych nie wpływała istotnie na wyniki testów poznawczych i ocenę dokuczliwości.

VI Dyskusja wyników

20. Dyskusja nad wynikami etapu I

Wyniki oceny dokuczliwości wg IC BEN (patrz: Tab. 17-8 Tab. 17-9) nie wykazały istotnego statystycznie wpływu zarówno poziomu maskera (czynnik: *masker*), ani komponentu „wiatru” (czynnik: *wind*) w maskerze (*masker* $F(3,204)=0,952$; $p=0,417$; *wind* $F(1,204)=0,422$; $p=0,517$). Nie wykazano również istotnych interakcji w teście Tukey’a (*masker* \times *wind* $F(3,204)=0,361$; $p=0,781$). Średnie oceny dokuczliwości dla wszystkich zastosowanych wariantów maskera *HD* (250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m) były zbliżone (średnie dokuczliwości: 4,2 – 5,8 na skali IC BEN), niezależnie od obecności wiatru w maskerze.

Analizując wyniki progu dyskryminacji *HTW* uzyskano silny efekt czynnika *masker* przy braku efektu czynnik *wind* i ich interakcji (patrz: Tab. 17-2; *masker* $F(3,208)=33,622$; $p<0,001$; $\omega^2=0,312$; *wind* $F(1,208)=1,294$; $p=0,257$; *masker* \times *wind* $F(3,208)=0,919$; $p=0,433$). Test post-hoc Tukey’a (patrz: Tab. 17-3) potwierdził istotne różnice między wynikami dla czynnika *masker* między wszystkimi poziomami *HD* w porównaniu z bodźcem *HD* prezentowanych w odległości 2000 m. Proste efekty czynnika *masker* były istotne zarówno bez wiatru ($F(3,104)=13,46$; $p<0,001$), jak i z wiatrem ($F(3,104)=24,32$; $p<0,001$). Tym samym zmiana poziomu bodźca maskującego (*HD* lub *HD+W*) wpływała na średnie progi dyskryminacji *HTW*. Bodźce akustyczne wiatru nie stanowiły istotnego statystycznie czynnika.

Przedstawione wyniki analizy progu dyskryminacji (a więc i wyznaczanego z niego poziomu *HTW* oraz SNR na progu) silnie zależą od poziomu maskera *HD*, podczas gdy dokuczliwość nie była istotnie powiązana ani z poziomem maskera *HD*, ani z obecnością komponentu wiatru. W praktyce oznacza to, że sam mechanizm wyboru „która próbka jest bardziej dokuczliwa” jest wrażliwy na zmiany poziomu *HTW*, ale nie przekłada się to na spadek ocen IC BEN. Uzyskane wyniki korespondują z [11], [105], wg których skuteczne maskowanie *HTW* jest możliwe dopiero, gdy poziom maskera przewyższa poziom *HTW* o kilka lub kilkanaście dB. Modulacja amplitudy (AM) w sygnale *HTW* obniża efektywność maskowania przez dźwięki stacjonarne [9], [10] (roślinność, morze) lub hałas ruchu drogowego [11], [105] ze względu na występowanie mechanizmu podobnego do zjawiska komodulacji (CMR – *comodulation masking release*) [139], [167].

Hałas wiatru stanowił dodatkowy bodziec dla maskera *HD*. W eksperymencie 2. połączono masker *HD* z naturalnym hałasem wiatru w celu wzmocnienia efektu maskowania *HTW*. Wiatr jest czynnikiem naturalnie występującym zawsze wtedy gdy *TW* pracuje i generuje hałas. Z tego względu dopatrywano się podobieństw w strukturze widmowej i przebiegu czasowym obu rodzajów hałasu. Mimo braku istotnego wpływu wiatru na obniżenie oceny dokuczliwości zastosowanie go z maskerem *HD* zwiększyło stopień trafności ekologicznej przeprowadzonego eksperymentu. Badania [168], [169] nad maskowaniem *HTW* naturalnie występującymi dźwiękami wiatru, szumu drzew lub morza wykazały niską skuteczność takich sygnałów.

Przyczyną prawdopodobnie jest przytoczone wcześniej zjawisko komodulacji wynikające z charakterystycznej dla *HTW* modulacji amplitudowej.

Wyznaczone wartości SNR (patrz: Tab. 17-1) pokazują, że *HTW* może być w pewnym stopniu zamaskowany przez *HD*, ale nie można tego maskowania określić skutecznym. Dodatkowo, wyznaczony stopień maskowania nie miał istotnego wpływu na ocenę dokuczliwości, co stoi w sprzeczności z nadrzędnym celem postawionym w rozprawie.

W odniesieniu do braku różnic w ocenach dokuczliwość istnieje możliwość, że ocena dokuczliwości nie dotyczyła wyłącznie *HTW*. W trakcie trwania eksperymentu badani nie byli informowani o źródle hałasu, którego bodźca słuchają. Badani po każdej części eksperymentów etapu I odpowiadali jakie cechy akustyczne prezentowanych bodźców wywoływały u nich odczucie dokuczliwości. W ten sposób sprawdzano, czy badani obrali właściwe „kryterium” dokuczliwości hałasu i w swoich wyborach wskazywali na dokuczliwość *HTW*. W większości przypadków opisy hałasu ocenianego jako bardziej dokuczliwy były związane z charakterystyką *HTW*. Badani jako dokuczliwe cechy najczęściej wymieniali: „narastanie” i „opadanie” dźwięku (AM), wrażenie stale przelatującego samolotu (szerokopasmowy szum *trailing edge*) oraz dudnienie spowodowane niskimi częstotliwościami. Niemniej w trakcie oceny dokuczliwości udzielane odpowiedzi mogły dotyczyć całokształtu odstuchiwanego bodźców. Przy dużej różnicy poziomów (średni SNR < -8) między sygnałem (*HTW*) a maskerem (*HD* / *HD+W*) istniało prawdopodobieństwo, że na dokuczliwość w większym stopniu wpływał poziom i widmo maskera. Tym bardziej, że był to hałas obecny we wszystkich prezentowanych próbkach. Nie tłumaczy to jednak braku istotnego efektu dla poziomu maskera na ocenę dokuczliwości.

W zastosowanej metodzie badawczej zmiana poziomu bodźców *HTW* następowała w wyniku modyfikacji widma hałasu. Poziomy bodźców były związane z odległościami w jakich zlokalizowana była *TW* względem punktu obserwacji. Zmiana widma odpowiadała pochłanianiu energii fali akustycznej na drodze propagacji między ustalonym położeniem *TW* a punktem obserwacji. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o metodę Nord2000, a ich wynikiem były funkcje przejścia, przez które filtrowano oryginalne nagrania *HTW*. Zastosowana metoda odróżnia przeprowadzone badanie od eksperymentów związanych z maskowaniem *HTW* przy pomocy *HD* [11], [12], [105]. W przytoczonych badaniach zmiana poziomu *HTW* polegała na zmianie całkowitego poziomu sygnału poprzez dodanie do poziomu jednoliczbowej poprawki. Nie odpowiada to wpływowi mechanizmów związanych z propagacją fali akustycznej w przestrzeni otwartej, które oddziałują na poszczególne pasma widma hałasu w zróżnicowany sposób.

21. Dyskusja nad wynikami etapu II

W przeprowadzonym eksperymencie osobom badanym prezentowano bodźce audiowizualne w środowisku VR różniące się stopniem zastonięcia turbiny przez roślinność (czynnikiem był stopień zastonięcia *TW*: „% zastonięcia”) oraz odległością, w której ją prezentowano (czynnikiem: *odległość*). Odległość, w której w środowisku VR prezentowano *TW* była związana z poziomem hałasu bodźców akustycznych zgodnie z Tab. 15-1. W zbadanym układzie czynnikowym 3 (% zastonięcia: „tip”, „hub”, „tower”) × 3 (odległość: 500, 750, 1000 m) nie stwierdzono istotnego wpływu samego % zastonięcia *TW* na ocenę dokuczliwości (% zastonięcia, $F(2,531)=0,762$, $p=0,467$) ani wpływu interakcji % zastonięcia z odległością (% zastonięcia × odległość, $F(4,531)=0,330$, $p=0,858$). Jedynym czynnikiem kształtującym oceny dokuczliwości była odległość od *TW* ($F(2,531)=10,123$, $p<0,001$). Średnie oceny dokuczliwości w sposób stały i nieznaczny malały wraz z oddalaniem się *TW* (500 m: 4,539; 750 m: 3,728; 1000 m: 3,633), przy braku różnic między % zastonięcia *TW* (tip: 3,911; hub: 3,867; tower: 4,122).

Testy Tukey’a (patrz: Tab. 18-3) potwierdziły istotne obniżenie ocen dokuczliwości zarejestrowanych dla bodźców prezentowanych w odległościach: 500 m a 750 m oraz pomiędzy odległościami: 500 m a 1000 m, przy jednoczesnym braku różnicy między odległościami: 750 m a 1000 m ($p=0,904$). Wskazuje to na wyraźny spadek oceny dokuczliwości przy zwiększeniu dystansu z 500 m na 750 m oraz stabilizację oceny dokuczliwości w zakresie 750 m – 1000 m. Sugeruje to, że dalsze zwiększanie odległości między *TW* a obserwatorem nie wpłynie na zmianę oceny dokuczliwości. Porównanie czynników % zastonięcia × odległość po analizie post-hoc (patrz: Tab. 18-4) nie wykazało istotnych statystycznie interakcji co może sugerować dominujący, choć niewielki, wpływ komponentu akustycznego nad bodźcem wizualnym *TW*.

Konfrontując uzyskane wyniki badań własnych z literaturą, należy podkreślić, że liczne prace wskazywały na podwyższoną ocenę dokuczliwości, gdy źródło hałasu było widoczne. W eksperymencie [170] wykazano, że dodanie bodźca wizualnego *TW* do odpowiadającego mu bodźca akustycznego zwiększa dokuczliwość, co interpretowano jako efekt integracji informacji wzrokowej i słuchowej oraz istotnej roli kontekstu krajobrazowego w ocenie dokuczliwości. W badaniach [121] modelowano wpływ widoczności turbin, nastawienia wizualnego (*visual attitude*) oraz geometrii pola widzenia. Autorzy tej pracy stwierdzili, że widok turbin oraz negatywna ocena ich wyglądu wzmacniają zależność między poziomem *HTW* a oceną jego dokuczliwości. Autorzy [171] wykazali bardziej ogólny efekt, tzn., że dla tych samych bodźców akustycznych samo zwiększenie widoczności źródła zwiększało dokuczliwość w porównaniu z sytuacją, w której źródło było przestonięte. Zjawisko powiązane z mechanizmami poznawczej interpretacji sceny i przypisywania dźwięku do źródła. Istnieją jednak badania, które potwierdzają uzyskane wyniki [172]. Zgodnie z doniesieniami Autorów zastonięcie źródła hałasu zielenią nie poprawiało oceny dokuczliwości hałasu, stwierdzono także, że efekt maskowania wizualnego malał wraz ze zwiększeniem poziomu hałasu źródła.

Możliwym wytłumaczeniem uzyskanych wyników jest wykonywanie przez badanych zadania w eksperymencie w bardzo precyzyjny sposób. Badani byli proszeni o ocenę dokuczliwości

hałas bodźca słuchowego, a nie dokuczliwości całego bodźca audiowizualnego. Słuchacze mogli z tego powodu koncentrować się wyłącznie na *HTW* ignorując bodźce wzrokowe, i w rezultacie minimalizować wagę informacji wzrokowej. Dodatkowy wpływ mógł mieć przeprowadzony trening postępowania się skalą IC BEN.

22. Dyskusja nad wynikami etapu III

W przeprowadzonym eksperymencie w ramach etapu III nie wykazano istotnego statystycznie wpływu *HTW* na zdolności poznawcze i ocenę dokuczliwości.

W badaniach oceniano wpływ ekspozycji *HTW* na aktywność mózgu, mierzoną wskaźnikiem TBR (*Theta/Beta Ratio*). Analiza wyników EEG wykazała wzrost TBR w trakcie pomiędzy kolejnymi etapami eksperymentu ($F_{1,42}=5,168$; $p=0,028$; $\eta^2p=0,110$), który jednak nie był istotny statystycznie ($p=0,077$). Taki wynik wskazuje na nieznaczne pogorszenie zdolności poznawczych wraz z upływem czasu, jednakże można to wytłumaczyć zmęczeniem spowodowanym czasem trwania eksperymentu, a nie ekspozycją na hałas. Uzyskane wyniki są zgodne z doniesieniami [173], [174], zgodnie z którymi ekspozycja na badanych na *HTW* w warunkach laboratoryjnych nie jest czynnikiem istotnych zmian w testach poznawczych ani w samopoczuciu. W podobnym badaniu nad wpływem *HTW* na sen [175], przy zastosowaniu tej samej metody pomiaru EEG stwierdzono, że *HTW* wywołuje nieznaczne zmiany w aktywności mózgu. Może to tłumaczyć nieznaczne pogorszenie wyników testów poznawczych uzyskane w przeprowadzonym badaniu. Nie ma jednak dowodów na negatywny wpływ *HTW* ocenianą jakość snu [176].

Brak istotnych różnic między grupami badanych (podział ze względu na ekspozycję na *HTW*, *HD* albo ciszę) oraz brak interakcji etap eksperymentu \times grupa wskazują, że rodzaj nagrania nie miał istotnego wpływu na zarejestrowaną aktywność mózgu.

Wyniki testu SART wskazały na brak istotnych różnic między grupami w zakresie poprawności odpowiedzi i czasu reakcji. Dowodzi to, że zdolność do utrzymania uwagi była niezależna od rodzaju prezentowanego nagrania. Brak efektu dla interakcji między etapem eksperymentu \times grupą potwierdza, że hałas turbin wiatrowych nie wpływał na zdolność do utrzymania uwagi w trakcie eksperymentu.

Podobne wyniki uzyskano w teście MaRs-IB, który oceniał zdolności rozumowania niewerbalnego i wnioskowania logicznego. Wyniki nie różniły się istotnie między grupami ani nie zmieniały się w czasie. Wynika z tego, że krótkotrwała ekspozycja na *HTW* lub *HD* nie wpływa negatywnie na zdolności rozwiązywania problemów wymagających myślenia abstrakcyjnego. Te wyniki są zgodne z pracami [106], [177], które nie znajdują uogólnionych deficytów poznawczych związanych z *HTW* po krótkiej ekspozycji.

Wyniki oceny dokuczliwości wg IC BEN *HTW* i *HD* przyjmowały bardzo małe wartości (*HTW*: 2,4, *HD*: 1,6; w skali 0-10). Warto przypomnieć, że skala IC BEN dla wartości 0 ma opis „Wcale nie dokuczliwy”, a uzyskane wartości są znacząco poniżej spodziewanych wartości. Sugeruje to, że

nagrania, na które byli eksponowani badani, nie były przez nich znacząco spostrzegane. Zwykle dokuczliwość rośnie wraz z poziomem ekspozycji hałasu i potęgowaniem się czynników kontekstowych, lecz zwykle nie przekłada się na obiektywne wskaźniki zdrowotne czy stres [106], [178].

Wyniki kwestionariusza DASS wykazały, że na deklarowany poziom negatywnych emocji: depresji, lęku i stresu nie miały wpływu warunki akustyczne. Brak różnic między grupami wskazuje, że krótka ekspozycja na hałas turbin wiatrowych nie wywołuje znaczących reakcji emocjonalnych. Analiza czynników indywidualnych takich jak skłonność do ruminacji, refleksyjności lub niska tolerancja na niejednoznaczność nie wykazała wpływu na negatywną percepcję *HTW* skutkującą gorszymi wynikami testów poznawczych, oceny dokuczliwości lub wpływu na poziom negatywnych emocji (kwestionariusz DASS).

VII Wnioski

23. Wnioski płynące z etapu I

Eksperymenty etapu I miały na celu zweryfikować hipotezę **H1: Hałas autostrady skutecznie maskuje hałas turbin wiatrowych**. Niestety uzyskane wyniki i ich dyskusja nie pozwalają jej potwierdzić.

Założenia przeprowadzonych eksperymentów przypominały te przyjęte w badaniu [179]. W ich wyniku stwierdzono, że hałas samochodowy nie może skutecznie zamaskować hałasu turbiny wiatrowej [11]. W innym badaniu [105], w którym podjęto próbę maskowania hałasu turbin wiatrowych hałasem samochodowym również stwierdzono, że hałas komunikacyjny nie jest odpowiednim źródłem hałasu maskującego. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów, przedstawione w Rozdz. 17, pozwalają wyciągnąć podobne wnioski, przede wszystkim ze względu na uzyskane ujemne wartości SNR.

Warto podkreślić, że przeprowadzone eksperymenty różniły się od realizowanych wcześniej badań [11], [12], [105] ze względu na lepiej dopracowaną metodykę i określenie warunków brzegowych. Do charakterystycznych cech przeprowadzonej metody badawczej należało:

- Wykorzystanie hałasu maskującego od drogi o dużym natężeniu ruchu w różnych odległościach,
- Możliwość prezentacji *HTW* w dowolnej odległości od osoby badanej dzięki zastosowaniu funkcji przejścia opartych na Nord2000,
- Przeprowadzenie badania bez informowania badanych o źródle słyszanych dźwięków. Na ocenę dokuczliwości oraz skuteczność detekcji nie miały wpływać czynniki pozaakustyczne.

Walorem przeprowadzonych eksperymentów był sposób przygotowania bodźców akustycznych, które umożliwiały prezentację hałasu badanego źródła w dowolnej odległości od położenia punktu obserwacji. Bodźce tworzono poprzez zmianę poziomów składowych pasm widma tercjowego zgodnie z mechanizmami fizycznymi rządzącymi falą akustyczną propagującą się w przestrzeni otwartej. Zaproponowana metoda stanowi alternatywę dla zmiany całkowitego poziomu dźwięku bodźców wykorzystywanych w eksperymentach. Do tej pory nie zaobserwowano w literaturze doniesień o wykorzystaniu w badaniach psychoakustycznych takiego podejścia. Rozpatrywano alternatywny sposób tworzenia bodźców *HTW* poprzez generowanie sygnału od podstaw na drodze modelowania szumu, jednakże nie jest to zadanie trywialne [98].

Zastosowana metoda, dzięki odniesieniu poziomów *HTW* do odpowiadających im odległości względem punktu obserwacji, miała umożliwić ocenę wprowadzanych zmian w prawie w zakresie odległości *TW* od zabudowy mieszkalnej. Niestety ze względu na brak istotnego wpływu na ocenę dokuczliwości nie ma możliwości przeprowadzenia merytorycznej polemiki.

Należy jednak podkreślić, że oddziaływanie akustyczne żadnego źródła hałasu nie powinno być opisywane sztywną miarą odległości. Dotyczy to szczególnie źródeł zlokalizowanych w przestrzeni otwartej, których hałas jest w istotny sposób powiązany z warunkami pogodowymi. *TW* jako szczególny przypadek źródła hałasu środowiskowego w zakresie emisji jest silnie zależna od zjawisk meteorologicznych. Zmiany w kierunku, prędkości, podmuchach wiatru wpływają nie tylko na zmianę kierunku propagacji emitowanego hałasu, ale także (a może przede wszystkim) na poziom mocy akustycznej, wynikającej z krzywej mocy *TW* (patrz: Rys. 5-1). Z tego powodu obliczanie zasięgu oddziaływania akustycznego *TW* powinno odbywać się na drodze obliczeń i modelowania dopasowanego do konkretnej lokalizacji, w której znajduje lub będzie znajdować się farma wiatrowa.

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano naturalnie występujące dźwięki wiatru dla zwiększenia skuteczności maskera *HD*. Hałas wiatru stanowił dodatkowy bodziec dla maskera *HD*. Analizując masker *HD* w dziedzinie czasu można uznać go za sygnał zmodulowany amplitudowo (w związku z przejazdami pojedynczych pojazdów) o dużym poziomie, jednak niespójny w dziedzinie częstotliwości (gęstość widmowa *HTW* i *HD* różni się w zakresie niskich częstotliwości). Hałas wiatru jest z kolei bardzo podobny w dziedzinie częstotliwości do *HTW* (patrz: Rys. 5-8), jednakże należy uznać go za sygnał stacjonarny, pozbawiony znacznych (i okresowych) fluktuacji poziomu dźwięku. Utworzony masker *HD+W* miał zniwelować mankamenty maskowania wyłącznie jednym rodzajem hałasu. Mimo braku istotnego wpływu na zmniejszenie oceny dokuczliwości, zastosowanie wiatru z maskerem *HD* pozytywnie wpłynęło na realizm prezentowanych próbek. *HD* ze względu na duże natężenie ruchu i charakterystykę hałasu odpowiadającą znacznemu oddaleniu źródła od punktu immisji stanowił masker o znikomej modulacji amplitudowej. Badania [168], [169] nad maskowaniem *HTW* naturalnie występującymi dźwiękami wiatru, szumu drzew lub morza wykazują niską skuteczność takich sygnałów. Przyczyną prawdopodobnie jest przytoczone wcześniej zjawisko komodulacji (CMR) wynikające głównie z charakterystycznej dla *HTW* modulacji amplitudowej.

Po przeprowadzeniu eksperymentów etapu I stwierdzono niską skuteczność *HD* oraz *HD+W* jako bodźców maskujących *HTW*. Uzyskane wyniki potwierdzają doniesienia literaturowe, pozwalając jednoznacznie stwierdzić, że *HTW* jest źródłem bardzo trudnym do maskowania. Należy poszukiwać innych metod redukcji dokuczliwości *HTW*, być może skupiając się na zmniejszeniu wpływu czynników pozaakustycznych.

24. Wnioski płynące z etapu II

W oparciu o wyniki analizy i przeprowadzoną dyskusję nie ma podstaw by potwierdzić hipotezę **H2: Czynniki wzrokowe mogą wpłynąć na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych.** Czynniki zastąpienia *TW* okazał się nieistotny statystycznie.

Metoda redukcji dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych poprzez zastąpienie źródła hałasu innym obiektem wydaje się być obiecującą formą redukcji wpływu pozaakustycznych czynników na ocenę dokuczliwości *HTW*. W literaturze przedmiotu można znaleźć prace potwierdzające tezę, że źródło hałasu przesłonięte przeszkodą, szczególnie naturalną, jest odbierane jako mniej dokuczliwe (patrz: Rozdz. 9.3.2). W przeprowadzonym w ramach tej rozprawy badaniu wykorzystującym audiowizualne bodźce turbiny wiatrowej, nie zaobserwowano wpływu zastąpienia turbiny wiatrowej na ocenianą dokuczliwość hałasu. Fakt ten w obliczu danych literaturowych jest zaskakujący. Istotnym czynnikiem okazała się zmiana poziomu *HTW* odzwierciedlona przez przybliżanie lub oddalanie *TW* w środowisku VR.

W Dyskusji (patrz: rozdział 21) nad wynikami tego eksperymentu wskazano, że na uzyskane wyniki, nie pokrywające się z literaturą naukową, wpływ mógł mieć przeprowadzony trening oceny dokuczliwości i instrukcja podkreślająca konieczność oceny wyłącznie bodźców akustycznych. Badani, zapytani po eksperymencie o stosunek do energetyki wiatrowej odpowiadali, że nie mają w stosunku do niej uprzedzeń, a podczas badania rzeczywiście starali się oceniać wyłącznie generowane przez turbinę dźwięki. W badaniu nie było jednak możliwości by wykluczyć wpływ innych czynników pozaakustycznych związanych z nastawieniem słuchaczy do technologii wiatrowej.

Wytłumaczeniem uzyskanych wyników może być fakt, że widok turbiny wiatrowej jest czynnikiem uniwersalnie dokuczliwym. Nie ma zatem znaczenia jak dobrze zostanie zastąpiona, ponieważ badani mając świadomość tego, jakie źródło znajduje się za zastoną będą je oceniać w ten sam sposób, niezależnie od poziomu bodźców czy bliskości źródła.

Niedociągnięciem w eksperymencie może być brak grupy referencyjnej, której nie prezentowano widoku *TW*. Kolejnym czynnikiem, który mógł wpłynąć na rozbieżności uzyskanych wyników z literaturą jest fakt, że eksperyment został przeprowadzony w wirtualnej rzeczywistości z wykorzystaniem gogli VR (ang. *virtual reality*). Takie podejście w badaniach psychoakustycznych nad hałasem środowiskowym nie jest częste. Autor dopatruje się w wykorzystaniu takiej technologii szansy na tworzenie bardziej angażujących i dających bardziej wiarygodne rezultaty eksperymentów. Dla kompletnego porównania wyników z literaturą warto w przyszłych badaniach uzupełnić eksperyment wykorzystujący VR o warunki „ekranowe” (monitor/projektor) i przeprowadzić badanie wśród dwóch grup badanych z zestawem identycznych bodźców audiowizualnych. Pozwoli to bezpośrednio sprawdzić, czy metoda wykorzystująca VR rzeczywiście pozytywnie wpływa na immersję słuchaczy w eksperymenty i czy prowadzi do innych (być może bardziej wiarygodnych) wyników. Do samej metody warto dodać obiektywne wskaźniki takie jak: *eye-tracking* (z ang. śledzenie ruchu gałek ocznych) lub pomiar potencjałów przewodnictwa skórnoego. Takie pomiary pozwalają wychwycić

bardzo subtelne efekty gdy subiektywna skala ocen okazuje się za mało czuła. Tym samym zwalniają badanych z podejmowania decyzji odnośnie usłyszanych dźwięków, oferując bardziej obiektywne wyniki. Podobne podejście prezentuje metoda zaproponowana w III etapie badań opisanych w niniejszej rozprawie.

25. Wnioski płynące z etapu III

Opierając się na pracy [99] dokuczliwość interpretowano jako zjawisko utrudniające skupienie się lub odciągające uwagę od wykonywanej czynności. Zgodnie z tą teorią, hałas, który nie jest dokuczliwy, nie będzie negatywnie wpływał na jakość wykonywanych zadań umysłowych i nie będzie pogarszał zdolności skupienia lub utrzymania uwagi.

Ocenę dokuczliwości w eksperymencie 4. przeprowadzono nowatorską metodą wykorzystując wskaźniki oceny zdolności poznawczych oraz standardową skalę oceny dokuczliwości wg ICBEN. Uzyskano tożsame wyniki – w obu przypadkach *HTW* oceniono jako mało dokuczliwy: nie wpływał na jakość wykonywanych zadań umysłowych, a na skali ocen dokuczliwości 0 - 10 uzyskał bardzo niską średnią wartość równą 2,4. Hałas turbin wiatrowych nie miał również wpływu na wywoływanie u badanych negatywnych emocji. Ocena odbywała się przy wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych. Badani nie byli informowani o źródłach hałasu, zaś zastosowane testy poznawcze eliminowały wpływ znajomości *HTW* i cech indywidualnych na końcowy rezultat. Eksperyment przygotowano tak, by w sposób możliwie obiektywny zbadać wpływ czynnika akustycznego *TW* na dokuczliwość.

Na tej podstawie stwierdzono, że wyniki eksperymentu i przeprowadzona analiza, pozwalają potwierdzić hipotezę H3: Precyzyjna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych.

Należy mieć na uwadze kilka istotnych aspektów, charakteryzujących przeprowadzone badania. Nagrania wykorzystane w eksperymencie prezentowały *HTW* zarejestrowane w odległości 500 m od punktu obserwacji. Odległość wybrano jako odległość graniczną, która na mocy zmian prawnych może stać się minimalną odległością *TW* od zabudowy mieszkalnej. Celem było zaprezentowanie najgorszych możliwych warunków. Takie podejście nie uwzględnia jednak sytuacji, której *TW* znajduje się w innej odległości. Podobnie jak we wnioskach do wcześniejszych eksperymentów, *HTW* został zarejestrowany podczas występowania konkretnych warunków meteorologicznych, które w ciągu roku znacząco się zmieniają. Ze względu na to, że zasięg oddziaływania *HTW* jest silnie związany z warunkami pogodowymi (patrz: rozdział 5.3) badania powinny być przeprowadzone dla zróżnicowanych sytuacji pogodowych.

Wyniki eksperymentu 4. uzyskano na podstawie relatywnie krótkiej ekspozycji na *HTW* (około 30 minut) w warunkach laboratoryjnych. Istnieje prawdopodobieństwo, że długotrwała ekspozycja, związana np. z zamieszkiwaniem w sąsiedztwie farmy wiatrowej, wpłynie na zmianę uzyskanych wyników.

Wyniki testów psychologicznych i ocena dokuczliwości mogłyby ulec zmianie jeżeli do udziału w eksperymencie zgłosiłyby się osoby, mieszkające w pobliżu farmy wiatrowej, które uznają *HTW* za dokuczliwy. Inną sytuacją wpływającą na wyniki byłoby pośrednie lub bezpośrednie informowanie badanych o źródle hałasu w prezentowanym nagraniu. Przeprowadzenie testów, w których badani są świadomi źródła hałasu dałoby wyniki prezentujące wpływ czynników

pozaakustycznych, szczególnie nastawienia do *TW*, na zdolności poznawcze co wydaje się być cenną wiedzą.

Ostatecznie wnioskiem analogicznym do postawionej hipotezy jest stwierdzenie, że czynniki pozaakustyczne mają istotny wpływ na ocenę dokuczliwości *HTW*, dla krótkotrwałej ekspozycji. Wniosek potwierdza doniesienia opisane w rozdziale 7.1.

VIII Podsumowanie

Zaprezentowana rozprawa podejmuje aktualny problem ochrony przed hałasem turbin wiatrowych (*HTW*). W pracy wskazano, że *HTW* jest oceniany jako bardziej dokuczliwy od innych źródeł hałasu pomimo rzadkich przekroczeń dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku.

Do czynników wywołujących wrażenie dokuczliwości *HTW* zalicza się:

- cechy akustyczne sygnału - komponent niskoczęstotliwościowy, składowe tonalne, modulacja amplitudy,
- czynniki pozaakustyczne - widoczność turbin, postawa wobec OZE lub sposób komunikacji i relacje z Zarządzającym farmą.

W celu redukcji dokuczliwości wywołanej *HTW* zaproponowano psychoakustyczne metody redukcji zmniejszające subiektywną dokuczliwość hałasu bez koniecznego obniżenia poziomu dźwięku w punkcie emisji. Takie metody określono mianem „miękkich metod redukcji” (*MMR*).

Przeprowadzony przegląd literatury oraz analiza stanu prawnego posłużyły do sformułowania trzech hipotez:

1. hipoteza **H1: Hałas autostrady skutecznie maskuje hałas turbin wiatrowych** (hipoteza H1 została odrzucona);
2. hipoteza **H2: Czynniki wzrokowe wpływają na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych** (hipoteza H2 została odrzucona);
3. hipoteza **H3: Precyzyjna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych** (hipoteza H3 została potwierdzona).

Hipotezy badawcze powiązano z trzema etapami badań eksperymentalnych (patrz: Tab. 12-1).

Etap I obejmował dwa eksperymenty polegające na maskowaniu *HTW* dźwiękami *HD* lub *HD+W*. Do wyznaczenia progów detekcji *HTW* na tle maskera wykorzystano metodę 2AFC z procedurą adaptacyjną *2u1d*. Wynikiem eksperymentu był próg spostrzegania *HTW* na tle maskera wyrażony stosunkiem sygnału *HTW* do szumu *HD / HD+W*. Równolegle przeprowadzono ocenę dokuczliwości *HTW* wg skali ICBEN. Dla wszystkich części eksperymentów etapu I uzyskano progi *HTW* na tle maskera o ujemnych wartościach SNR (-8 dB do -15 dB). Próg detekcji *HTW* na tle maskera na tle został podniesiony dopiero przy znacznej różnicy poziomów *HTW* i *HD / HD+W*. Wskazuje to na małą skuteczność *HD / HD+W* jako maskera dla *HTW*. Maskowanie nie wpłynęło istotnie na zmniejszenie dokuczliwości *HTW* co wykazała analiza statystyczna ocen dokuczliwości wg skali ICBEN. Nie stwierdzono istotnych efektów głównych wywołanych poziomem *HD* lub obecności komponentu „wiatru” w maskerze (ANOVA: *masker* $F(3,204)=0,952$; *wiatr* $F(1,204)=0,422$; interakcja *masker* × *wiatr* również nie była istotna). Wyniki eksperymentów nie pozwoliły potwierdzić hipotezy **H1: Hałas autostrady skutecznie maskuje hałas turbin wiatrowych**.

W etapie II przeprowadzono eksperyment w środowisku wirtualnej rzeczywistości (VR). W eksperymencie badano wpływ czynnika pozaakustycznego widoczności *TW* na ocenę dokuczliwości *HTW*. Kontrolowano odległość (położenie) *TW* od słuchacza i stopień jej zastąpienia przez drzewa. Przeciwnie do eksperymentów etapu I odległość prezentacji *TW* odpowiadała poziomowi *HTW*, który zarejestrowano podczas pomiarów terenowych. W badaniu nie wykorzystywano bodźców maskujących. Przygotowany eksperyment obejmował ocenę dokuczliwości wg ICBEN dla różnych odległości *TW* od punktu obserwacji i stopnia zastąpienia. Przeprowadzona analiza wykazała, że zmiana poziomu *HTW* w istotny sposób wpływa na ocenę dokuczliwości, co znajduje w literaturze. Stopień zastąpienia *TW* drzewami nie był czynnikiem istotnym statystycznie, co stoi w sprzeczności z doniesieniami z aktualną wiedzą. Nie stwierdzono również interakcji między czynnikami odległość (poziom) × zastąpienie *TW*. Wskazuje to, że w przeprowadzonym eksperymencie głównym czynnikiem wywołującym dokuczliwość była odległość *TW* od obserwatora i związany z nim poziom prezentacji *HTW*. Wnioski z etapu II doprowadziły do odrzucenia hipotezy **H2: Czynniki wzrokowe wpływają na ocenę dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych.**

W etapie III do określenia dokuczliwości hałasu wykorzystano metody kognitywne. Przeprowadzono badanie EEG i testy poznawcze SART oraz MaRs-IB. Zaproponowane podejście miało stanowić dokładniejszą alternatywę dla oceny dokuczliwości wg skali ICBEN poprzez wykluczenie czynników pozaakustycznych. Badani wypełniali także kwestionariusz stanów emocjonalnych DASS, a dla porównania uzyskanych wyników z wcześniejszymi badaniami oceniali dokuczliwość *HTW* wg skali ICBEN. Badano wpływ ekspozycji *HTW*, *HD* oraz ciszy na wyniki testów poznawczych, aktywność mózgu i stan emocjonalny badanych. Zmiana tych wskaźników w wyniku ekspozycji na hałas miała być interpretowana jako dokuczliwość. Pomiar EEG nie wykazały różnic statystycznych wskaźnika TBR między grupami eksponowanymi na *HTW*, *HD* lub ciszę. Nie występowały również istotne interakcje związane między etapami badania: niewielki wzrost TBR wraz z postępowaniem eksperymentu zinterpretowano jako zmęczenie/znużenie badanych, a nie wpływ hałasu na aktywność mózgu. Podobnie w testach SART i MaRs-IB nie stwierdzono istotnych różnic między grupami i między etapami, a wyniki kwestionariusza DASS nie wykazały pojawienia się negatywnych emocji po ekspozycji na przygotowane bodźce. Oceny wg skali ICBEN były niskie, bez istotnych różnic wynikających z rodzaju prezentowanego bodźca akustycznego. Rezultaty testów kognitywnych są zgodne ze standardową oceną wg skali ICBEN: krótkotrwała ekspozycja na hałas nie skutkowała pogorszeniem funkcji poznawczych ani stanu emocjonalnego utożsamianych z dokuczliwością. Wyniki etapu III pozwoliły potwierdzić hipotezę **H3: Precyzyjna ocena dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych jest możliwa po wyeliminowaniu czynników pozaakustycznych.** Pozwala to stwierdzić, że metody kognitywne mogą stanowić alternatywną metodę oceny dokuczliwości

Dyskusja wyników pozwoliła wyciągnąć następujące wnioski:

- Ze względu na niską skuteczność *HD* jako maskera dla *HTW* nie ma przesłanek do lokalizowania farm wiatrowych w pobliżu autostrad lub dróg szybkiego ruchu jako forma *MMR*. Niska skuteczność maskowania *HTW* wynika ze zjawiska komodulacji.

- Stopień zastonięcia *TW* nie miał większego wpływu na dokuczliwość hałasu od odległości między obserwatorem a *TW*. Nie stwierdzono, czy na dokuczliwość *HTW* wpływ miał poziomy komponentu akustycznego bodźców audiowizualnych czy komponent wzrokowy. Należy rozważyć przygotowanie do przyszłych eksperymentów bodźców audiowizualnych, w których *TW* jest całkowicie zastonięta. Równocześnie konieczne jest wyodrębnienie spośród osób chętnych badaniem dwóch grup kontrolnych. Ich zadaniem będzie: (1) ocena bodźców audiowizualnych pozbawionych *TW* (scena prezentuje wyłącznie otoczenie) oraz (2) ocena bodźców audiowizualnych prezentującą *TW*, ale bez emitowanego przez nią hałasu.
- Zastosowane metody kognitywne wykazały spójne wyniki z oceną dokuczliwości wg skali IC BEN. Stanowi to motywację do zastosowania badań poznawczych do oceny dokuczliwości innych źródeł hałasu. Należy zwrócić uwagę, że badania przeprowadzono dla krótkoterminowej ekspozycji na hałas. Nie odzwierciedla to dokuczliwości spowodowanej długotrwałą ekspozycją na *HTW* zwłaszcza u osób mieszkających w sąsiedztwie farm wiatrowych.
Propozycją kontynuacji badań nad obiektywną oceną dokuczliwości *HTW* jest zbadanie funkcji poznawczych osób mieszkających w pobliżu miejsca powstawania nowej farmy wiatrowej. Badanie należałoby przeprowadzić dwukrotnie: przed i po rozpoczęciu pracy elektrowni wiatrowych na farmie.
- We wszystkich przeprowadzonych badaniach wykorzystano nagrania *HTW* zarejestrowane dla określonych warunków meteorologicznych. Pomimo tego, że starano się uchwycić typowe warunki panujące na farmie wiatrowej, nawet niewielka zmiana w kierunku lub prędkości wiatru może skutkować znaczną zmianą np. w poziomie mocy akustycznej *TW* (patrz: Rys. 5-1). Celem uchwycenia ogólnego wpływu rozpatrywanych *MMR* na dokuczliwość hałasu należy przeprowadzić eksperymenty uwzględniając bardziej zróżnicowane warunki pogodowe. Pomocne w tym zakresie mogą być klasy pogodowe zdefiniowane przez metodykę Nord2000 [129].

W toku przeprowadzonych badań nie udało się zweryfikować skuteczności *MMR* w sposób zadowalający. Nie oznacza to, że należy zrezygnować z prowadzenia badań w zakresie rozwoju tego typu rozwiązań. *MMR* bazują na oddziaływaniu z *HTW* lub *TW* innych obiektów i źródeł hałasu, które są obecne w sąsiedztwie farm wiatrowych. Opracowanie *MMR*, bazujących na dostosowaniu otoczenia farm wiatrowych do skutecznego zmniejszenia oceny dokuczliwości, będzie rozwiązaniem wymagającym znikomych (w porównaniu z *TMR*) środków finansowych do poprawienia dobrostanu i redukcji dokuczliwości osób mieszkających w pobliżu *TW*.

Za koniecznością rozwijania *MMR* przemawia również literatura naukowa i rezultaty eksperymentów mówiące o roli czynników pozaakustycznych i charakterystyki *HTW*. Wyeliminowanie czynników pozaakustycznych w III etapie badań pozwoliło zredukować średnią ocenę dokuczliwości. Istotność czynników psychoakustycznych (np. różnice widm *HTW* i maskera, modulacja amplitudowa) ujawniły wyniki I etapu badań. Nieodpowiednio dobrany masker *HD*, pomimo znacznej różnicy poziomów ($SNR < -8\text{dB}$), nie był w stanie wpłynąć na zmniejszenie dokuczliwości *HTW*. Zastosowanie hałasu wiatru, którego celem było zniwelowanie różnic widm *HTW* i *HD*, ze względu na zjawisko komodulacji (*CMR*), nie spowodowało istotnej poprawy dokuczliwości. Powyższe spostrzeżenia podkreślają rolę oceny

dokuczliwości opartej na eksperymentach psychoakustycznych i wnioskach z nich płynących. W praktyce, opieranie się wyłącznie na badaniach ankietowych i różnicy całkowitych poziomów sygnału i maskera, bez wnikliwego porównania charakterystyki czasowej i częstotliwościowej tych dźwięków może doprowadzić do nieskutecznego maskowania hałasu.

Dokuczliwość *HTW* jest wypadkową bardzo wielu czynników. Okazuje się, że akustyczny komponent dokuczliwości nie jest tak istotny jak do niedawna wielu uważało. Zaprezentowane MMR są rozwiązaniami z pogranicza akustyki środowiskowej, psychoakustyki i tzw. *soundscape*'u. Element pejzażu akustycznego jest silnie związany z aspektem psychologicznym, determinującym, czy ludzie chcą przebywać w danym miejscu eksponowanym na hałas. Zadaniem *soundscape*'u jest stworzenie takich warunków by pomimo hałasu, wybrane miejsce było atrakcyjne do pracy, komunikacji lub wypoczynku. W dobie postępu technologicznego, gdy z każdym rokiem zwiększa się liczba wszelkich źródeł hałasu w otoczeniu gospodarstw domowych, należy rozpatrywać ochronę przed hałasem nie tylko w kontekście spełnienia standardów środowiskowych. W ocenie Autora rozwój metod redukcji hałasu powinien być związany z tzw. MMR i podejściem *soundscape*'owym, by zadbać o to by hałas nie obniżał jakości życia każdego z nas.

IX Bibliografia

- [1] Komisja Europejska, *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Europejski Zielony Ład*. Komisja Europejska, 2019.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, „AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023”. Dostęp: 19 sierpień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [3] „Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne”.
- [4] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, *Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych z późniejszymi zmianami*. 2016.
- [5] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, *Ustawa z dnia 9 marca 2023 r. o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw*. 2023.
- [6] „Hetman – Healthy society-towards optimal management of wind turbines’ noise”. Dostęp: 24 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://hetman-wind.ios.edu.pl/>
- [7] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku z późniejszymi zmianami*. 2014.
- [8] S. A. Janssen, H. Vos, A. R. Eisses, i E. Pedersen, „A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources”, *J Acoust Soc Am*, t. 130, nr 6, s. 3746–3753, grudz. 2011, doi: 10.1121/1.3653984.
- [9] K. Bolin, „Wind Turbine Noise and Natural Sounds : Masking, Propagation and Modeling”, 2009. [Online]. Dostępne na: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:217217/FULLTEXT01.pdf%0Ahttp://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-10434>
- [10] K. Bolin, „Masking of wind turbine sound by ambient noise”, 2006. [Online]. Dostępne na: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:11339>
- [11] E. Pedersen i F. Van Den Berg, „Why is wind turbine noise poorly masked by road traffic noise?”, w *39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010*, 2010, s. 1306–1315.
- [12] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, i J. Bouma, „Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound”, *Energy Policy*, t. 38, nr 5, s. 2520–2527, maj 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.01.001.

- [13] D. S. Michaud *i in.*, „Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance”, *J Acoust Soc Am*, t. 139, nr 3, s. 1455–1466, mar. 2016, doi: 10.1121/1.4942390.
- [14] WindEurope, *Wind energy in Europe. 2024 Statistics and the outlook for 2025-2030*. 2025.
- [15] Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, *Energetyka wiatrowa w Polsce. Raport 2024*. PSEW, 2024.
- [16] „Moja Elektrownia Wiatrowa – Program dofinansowania elektrowni wiatrowych”. Dostęp: 19 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://mojaelektrowniawiatrowa.gov.pl/>
- [17] NCBiR, „Wielkie Wyzwanie Energia”. Dostęp: 27 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://wielkiewyzwanie.ncbr.gov.pl/>
- [18] W. Shepherd i L. Zhang, *Electricity Generation Using Wind Power*. WORLD SCIENTIFIC, 2011. doi: 10.1142/7703.
- [19] W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*, t. 48, nr 07. Boston: WIT Press, 2011. doi: 10.5860/choice.48-3904.
- [20] E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3. wyd. Springer Berlin, Heidelberg, 2013.
- [21] „Main Components of Wind Turbine”. Dostęp: 19 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.windustry.com/main-components-of-wind-turbine.htm>
- [22] R. Prosun, „An Overview of Aerodynamic Behaviour of Wind Turbine Blade”, *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, t. 4, nr 1, s. 40–47, 2016, Dostęp: 19 wrzesień 2025. [Online]. Dostępne na: www.iaster.com
- [23] Betz Albert, „Windmills in the light of modern research (NACA-TM-474)”, 1928.
- [24] *Renewable Energy - Volume 1: Solar, Wind, and Hydropower*. Elsevier, 2023. doi: 10.1016/C2021-0-02341-5.
- [25] Y. A. Çengel i J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [26] N. Sedaghatizadeh, M. Arjomandi, B. Cazzolato, i R. Kelso, „Wind farm noises: Mechanisms and evidence for their dependency on wind direction”, *Renew Energy*, t. 109, s. 311–322, sie. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.046.
- [27] *IEC 61400-11 Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques*.
- [28] Nordex Energy GmbH, „Noise level, Power curves, Thrust curves Nordex N117/3000”, 2012.

- [29] H. Tachibana i H. Yano, „Assessment of wind turbine noise in immission areas”, *5th International Conference on Wind Turbine Noise Denver 28-30 August 2013*, 2013.
- [30] V. Katinas, M. Marčiukaitis, i M. Tamašauskiene, „Analysis of the wind turbine noise emissions and impact on the environment”, 1 maj 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2015.12.140.
- [31] S. Oerlemans, P. Sijtsma, i B. Méndez López, „Location and quantification of noise sources on a wind turbine”, *J Sound Vib*, t. 299, nr 4–5, s. 869–883, luty 2007, doi: 10.1016/j.jsv.2006.07.032.
- [32] S. Deshmukh, S. Bhattacharya, A. Jain, i A. R. Paul, „Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review”, w *Energy Procedia*, 2019, s. 633–640. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.215.
- [33] C. Hansen, C. Doolan, i K. Hansen, *Wind farm noise: measurement, assessment, and control*. United States: John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [34] C. Hansen i K. Hansen, „Recent Advances in Wind Turbine Noise Research”, *Acoustics*, t. 2, nr 1, s. 177–206, 2020, doi: 10.3390/acoustics2010013.
- [35] F. van den Berg, „Wind turbine noise: an overview of acoustical performance and effects on residents”, *Proceedings of Acoustics 2013-Victor Harbor*, 2013.
- [36] B. Zajamsek i in., „Experimental and numerical investigation of blade–tower interaction noise”, *J Sound Vib*, t. 443, s. 362–375, mar. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.048.
- [37] C. Doolan, „Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control”, w *Australian Acoustical Society Conference 2011, Acoustics 2011: Breaking New Ground*, 2011, s. 494–500.
- [38] J. N. Pinder, „Mechanical Noise from Wind Turbines”, *Wind Engineering*, t. 16, nr 3, s. 158–168, mar. 1992.
- [39] D. Oliva, V. Hongisto, i A. Haapakangas, „Annoyance of low-level tonal sounds – Factors affecting the penalty”, *Build Environ*, t. 123, s. 404–414, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.07.017.
- [40] Y. Okada, K. Yoshihisa, K. Higashi, i N. Nishimura, „Horizontal directivity of sound emitted from wind turbines”, *Acoust Sci Technol*, t. 37, s. 239–246, 2016, doi: 10.1250/ast.37.239.
- [41] S. Oerlemans i J. G. Schepers, „Prediction of Wind Turbine Noise and Validation against Experiment”, *Int J Aeroacoust*, t. 8, nr 6, s. 555–584, sie. 2009, doi: 10.1260/147547209789141489.
- [42] Y. Okada, K. Yoshihisa, i S. Hyodo, „Directivity of amplitude modulation sound around a wind turbine under actual meteorological conditions”, *Acoust Sci Technol*, t. 40, nr 1, s. 40–48, 2019, doi: 10.1250/ast.40.40.

- [43] American Meteorological Society Glossary of Meteorology, „Aerodynamic roughness length”. Dostęp: 2 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Aerodynamic_roughness_length
- [44] Oerlemans S., „An explanation for enhanced amplitude modulation of wind turbine noise”, *National Aerospace Laboratory NLR*, cze. 2011.
- [45] S. Von Hünerbein, A. King, B. Piper, i M. C. Svh, „Work Package B(2): Development of an AM Dose-Response Relationship”, w *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause & Effect*, RenewableUK, 2013.
- [46] H. Lindsay, „Wind and Temperature Effects on Sound Propagation”, *New Zealand Acoustics*, 2006.
- [47] „The Effect of Wind and Temperature Gradients on Sound Waves”. Dostęp: 27 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.softdb.com/blog/effect-of-wind-and-temperature-gradients-on-sound-waves/>
- [48] E. Barlas, K. L. Wu, W. J. Zhu, F. Porté-Agel, i W. Z. Shen, „Variability of wind turbine noise over a diurnal cycle”, *Renew Energy*, t. 126, s. 791–800, paź. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.086.
- [49] H. Møller i C. S. Pedersen, „Low-frequency noise from large wind turbines”, *J Acoust Soc Am*, t. 129, nr 6, s. 3727–3744, cze. 2011, doi: 10.1121/1.3543957.
- [50] A. Zagubień i K. Wolniewicz, „The impact of supporting tower on wind turbine noise emission”, *Applied Acoustics*, t. 155, s. 260–270, grudz. 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.05.032.
- [51] Bass Jeremy i in., *Noise Working Group (Wind Turbine Noise) Amplitude Modulation Working Group Final Report A Method for Rating Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise*. Institute of Acoustics IOA, 2016.
- [52] C. Hansen i K. Hansen, „Recent Advances in Wind Turbine Noise Research”, *Acoustics*, t. 2, nr 1, s. 177–206, mar. 2020, doi: 10.3390/acoustics2010013.
- [53] „Wind Turbine Noise Amplitude Modulation Xi Engineering Consultants”. Dostęp: 27 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://xiengineering.com/wind-turbine-noise-amplitude-modulation/>
- [54] S. Yokoyama, S. Sakamoto, i H. Tachibana, „Study on the amplitude modulation of wind turbine noise: part 2-Auditory experiments”, w *Internoise 2013*, 2013.
- [55] Department of Planning Housing and Infrastructure, *Wind Energy Guideline*. dphi.nsw.gov.au, 2024.

-
- [56] Preis, Anna and Gjestland, Truls, „How to Determine the Annoyance Due to the Wind Turbine”, *Vibrations in Physical Systems*, t. 33, nr 3, s. 2022316–2022319, 2022, doi: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.19.
- [57] E. Ozimek, *Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, Wydanie II. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018.
- [58] E. Pedersen i K. Persson Waye, „Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship”, *J Acoust Soc Am*, t. 116, nr 6, s. 3460–3470, 2004, doi: 10.1121/1.1815091.
- [59] R. Makarewicz i R. Gołebiewski, „The Influence of a low level jet on the thumps generated by a wind turbine”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 104, s. 337–342, kwi. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.01.022.
- [60] I. van Kamp i F. van den Berg, „Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound”, *Acoust Aust*, t. 46, nr 1, s. 31–57, 2018, doi: 10.1007/s40857-017-0115-6.
- [61] R. Tonin, „A Review of Wind Turbine-Generated Infrasound: Source, Measurement and Effect on Health”, *Acoust Aust*, t. 46, nr 1, s. 69–86, 2018, doi: 10.1007/s40857-017-0098-3.
- [62] M. Pawlaczyk-Łuszczynska, A. Dudarewicz, I. Myshchenko, i A. Bortkiewicz, „Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na zdrowie i samopoczucie człowieka. Część I: przegląd badań eksperymentalnych”, *Med Pr*, t. 74, nr 4, s. 317–332, 2023, doi: 10.13075/MP.5893.01354.
- [63] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r . Prawo ochrony środowiska*.
- [64] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, „Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 26 lipca 2021 r. w sprawie programu ochrony środowiska przed hałasem z późniejszymi zmianami”, 2024.
- [65] Kokowski Piotr, *Obliczanie efektów zdrowotnych. Skrót opracowania pn.: Wytyczne oceny wskaźników zdrowotnych hałasu w środowisku*. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2022.
- [66] J. L. Davy, K. Burgemeister, i D. Hillman, „Wind turbine sound limits: Current status and recommendations based on mitigating noise annoyance”, *Applied Acoustics*, t. 140, s. 288–295, lis. 2018, doi: 10.1016/J.APACOUST.2018.06.009.
- [67] R. Makarewicz, *Hałas w środowisku*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych, 1996.

- [68] A. H. Poulsen *i in.*, „Short-term nighttime wind turbine noise and cardiovascular events: A nationwide case-crossover study from Denmark”, *Environ Int*, t. 114, s. 160–166, maj 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.02.030.
- [69] J. A. Morsing *i in.*, „Wind turbine noise and sleep: Pilot studies on the influence of noise characteristics”, *Int J Environ Res Public Health*, t. 15, nr 11, 2018, doi: 10.3390/ijerph15112573.
- [70] E. O. do Nascimento, F. L. de Oliveira, L. N. de Oliveira, i P. H. T. Zannin, „Noise prediction based on acoustic maps and vehicle fleet composition”, *Applied Acoustics*, t. 174, 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107803.
- [71] J. Hong, J. Kim, C. Lim, K. Kim, i S. Lee, „The effects of long-term exposure to railway and road traffic noise on subjective sleep disturbance”, *J Acoust Soc Am*, t. 128, nr 5, s. 2829–2835, lis. 2010, doi: 10.1121/1.3493437.
- [72] J. H. Schmidt i M. Klokke, „Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review”, *PLoS One*, t. 9, nr 12, grudz. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0114183.
- [73] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, i J. Bouma, „Response to noise from modern wind farms in The Netherlands”, *J Acoust Soc Am*, t. 126, nr 2, s. 634–643, sie. 2009, doi: 10.1121/1.3160293.
- [74] A. Freiberg, C. Scheffer, M. Girbig, V. C. Murta, i A. Seidler, „Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review”, 1 luty 2019, *Academic Press Inc.* doi: 10.1016/j.envres.2018.11.032.
- [75] M. Sørensen *i in.*, „Road Traffic Noise and Stroke: A Prospective Cohort Study”, *Epidemiology*, t. 22, nr 1, 2011.
- [76] M. Sørensen *i in.*, „Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: A Cohort Study”, *Environ Health Perspect*, t. 121, nr 2, s. 217–222, 2013, doi: 10.1289/ehp.1205503.
- [77] J. Radun, H. Maula, P. Saarinen, J. Keränen, R. Alakoivu, i V. Hongisto, „Health effects of wind turbine noise and road traffic noise on people living near wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 157, s. 112040, kwi. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.112040.
- [78] I. van Kamp i F. van den Berg, „Health Effects Related to Wind Turbine Sound: An Update”, *Int J Environ Res Public Health*, t. 18, nr 17, wrz. 2021, doi: 10.3390/IJERPH18179133.
- [79] World Health Organization, „Environmental Noise Guidelines for the European Region”, 2018.

-
- [80] M. Basner *i in.*, „Review Auditory and non-auditory effects of noise on health”, *The Lancet*, t. 383, s. 1325–1332, 2014, doi: 10.1016/S0140-6736(13)61613-X.
- [81] T. Münzel, T. Gori, W. Babisch, i M. Basner, „Cardiovascular effects of environmental noise exposure”, *Eur Heart J*, t. 35, s. 829–836, 2014, doi: 10.1093/eurheartj/ehu030.
- [82] X. Chen *i in.*, „Environmental noise exposure and health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and meta-analysis”, *Eur J Public Health*, t. 33, nr 4, s. 725–731, sie. 2023, doi: 10.1093/EURPUB/CKAD044.
- [83] O. Hahad, J. H. Prochaska, A. Daiber, i T. Muenzel, „Environmental Noise-Induced Effects on Stress Hormones, Oxidative Stress, and Vascular Dysfunction: Key Factors in the Relationship between Cerebrocardiovascular and Psychological Disorders”, *Oxid Med Cell Longev*, t. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/4623109.
- [84] A. Daiber *i in.*, „Environmental noise induces the release of stress hormones and inflammatory signaling molecules leading to oxidative stress and vascular dysfunction—Signatures of the internal exposome”, *BioFactors*, t. 45, nr 4, s. 495–506, lip. 2019, doi: 10.1002/BIOF.1506.
- [85] T. Münzel, M. Sørensen, i A. Daiber, „Transportation noise pollution and cardiovascular disease”, *Nat Rev Cardiol*, t. 18, nr 9, s. 619–636, wrz. 2021, doi: 10.1038/S41569-021-00532-5.
- [86] T. Münzel, A. Daiber, N. Engelmann, M. Röösli, M. Kuntic, i J. L. Banks, „Noise causes cardiovascular disease: it’s time to act”, *J Expo Sci Environ Epidemiol*, t. 35, nr 1, s. 24–33, 2025, doi: 10.1038/s41370-024-00732-4.
- [87] T. Münzel *i in.*, „Effects of noise on vascular function, oxidative stress, and inflammation: Mechanistic insight from studies in mice”, *Eur Heart J*, t. 38, nr 37, s. 2838–2849, paź. 2017, doi: 10.1093/EURHEARTJ/EHX081.
- [88] F. P. Schmidt *i in.*, „Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults”, *Eur Heart J*, t. 34, nr 45, grudz. 2013, doi: 10.1093/EURHEARTJ/EHT269.
- [89] C. Clark, C. Crumpler, i H. Notley, „Evidence for Environmental Noise Effects on Health for the United Kingdom Policy Context: A Systematic Review of the Effects of Environmental Noise on Mental Health, Wellbeing, Quality of Life, Cancer, Dementia, Birth, Reproductive Outcomes, and Cognition”, *Int J Environ Res Public Health*, t. 17, nr 2, sty. 2020, doi: 10.3390/IJERPH17020393.
- [90] I. C. Eze *i in.*, „Incidence of depression in relation to transportation noise exposure and noise annoyance in the SAPALDIA study”, *Environ Int*, t. 144, lis. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106014.

- [91] L. Guo *in.*, „Effects of environmental noise exposure on DNA methylation in the brain and metabolic health”, *Environ Res*, t. 153, s. 73–82, luty 2017, doi: 10.1016/J.ENVRES.2016.11.017.
- [92] J. Selander, L. Rylander, M. Albin, U. Rosenhall, M. Lewné, i P. Gustavsson, „Full-time exposure to occupational noise during pregnancy was associated with reduced birth weight in a nationwide cohort study of Swedish women”, *Science of the Total Environment*, t. 651, s. 1137–1143, luty 2019, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.09.212.
- [93] I. Bendokiene, R. Grazuleviciene, i A. Dedele, „Risk of hypertension related to road traffic noise among reproductive-age women”, *Noise Health*, t. 13, nr 55, s. 371–377, lis. 2011, doi: 10.4103/1463-1741.90288.
- [94] N. Natarajan, S. Batts, i K. M. Stankovic, „Noise-Induced Hearing Loss”, *J Clin Med*, t. 12, nr 6, mar. 2023, doi: 10.3390/JCM12062347.
- [95] Y. Lee, S. Lee, i W. Lee, „Occupational and Environmental Noise Exposure and Extra-Auditory Effects on Humans: A Systematic Literature Review”, *Geohealth*, t. 7, nr 6, s. e2023GH000805, cze. 2023, doi: 10.1029/2023GH000805.
- [96] D. Ouis, „ANNOYANCE FROM ROAD TRAFFIC NOISE: A REVIEW”, *J Environ Psychol*, t. 21, nr 1, s. 101–120, mar. 2001, doi: 10.1006/JEVP.2000.0187.
- [97] L. Fredianelli, S. Carpita, i G. Licitra, „A procedure for deriving wind turbine noise limits by taking into account annoyance”, *Science of the Total Environment*, t. 648, s. 728–736, sty. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.107.
- [98] P. Thorsson, K. P. Waye, M. Ögren, M. Smith, E. Pedersen, i J. Forssén, „Creating sound immission mimicking real-life characteristics from a single wind turbine”, *Applied Acoustics*, t. 143, s. 66–73, 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.08.015.
- [99] R. Guski, U. Felscher-Suhr, i R. Schuemer, „THE CONCEPT OF NOISE ANNOYANCE: HOW INTERNATIONAL EXPERTS SEE IT”, *J Sound Vib*, t. 223, nr 4, s. 513–527, cze. 1999, doi: 10.1006/JSVI.1998.2173.
- [100] D. A. Laird i K. Coye, „PSYCHOLOGICAL MEASUREMENTS OF ANNOYANCE AS RELATED TO PITCH AND LOUDNESS”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 1, s. 38, 1929.
- [101] D. Västfjäll, „Influences of Current Mood and Noise Sensitivity on Judgments of Noise Annoyance”, *J Psychol*, t. 136, nr 4, s. 357–370, 2002, doi: 10.1080/00223980209604163.
- [102] F. L. Hall, S. M. Taylor, i S. E. Birnie, „Activity interference and noise annoyance”, *J Sound Vib*, t. 103, nr 2, s. 237–252, lis. 1985, doi: 10.1016/0022-460X(85)90236-6.
- [103] S. Fidell, „Why is annoyance so hard to understand”, w *Environmental Annoyance: Characterization, Measurement, and Control. Proceedings of the International*

Symposium on Environmental Annoyance, H. S. Koelega, Red., Woudschoten: Elsevier Science Publishers, 1987.

- [104] Fundusze Europejskie dla Pomorza, „STEREOTYPY, UPRZEDZENIA, DYSKRYMINACJA”. [Online]. Dostępne na: <https://rpo.pomorskie.eu/wp-content/uploads/2023/01/Stereotypy.pdf>
- [105] T. Van Renterghem, A. Bockstael, V. De Weirt, i D. Botteldooren, „Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise”, *Science of the Total Environment*, t. 456–457, s. 333–345, lip. 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.095.
- [106] D. S. Michaud *i in.*, „Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects”, *J Acoust Soc Am*, t. 139, nr 3, s. 1443–1454, mar. 2016, doi: 10.1121/1.4942391.
- [107] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, i J. Bouma, „Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound”, *Energy Policy*, t. 38, nr 5, s. 2520–2527, maj 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.01.001.
- [108] M. Buszkiewicz, A. Wicher, i P. Remigiusz, „Method for determining the threshold of wind turbine noise masking by highway noise as function of distance”, *Proceedings of Forum Acusticum 2023: 10th Convention of EAA*, 2023, doi: 10.61782/fa.2023.0487.
- [109] P. M. Arezes, C. A. Bernardo, E. Ribeiro, i H. Dias, „Implications of wind power generation: exposure to wind turbine noise”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, t. 109, s. 390–395, 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.12.478.
- [110] R. Klæboe i H. B. Sundfør, „Windmill noise annoyance, visual aesthetics, and attitudes towards renewable energy sources”, *Int J Environ Res Public Health*, t. 13, nr 8, s. 746, lip. 2016, doi: 10.3390/ijerph13080746.
- [111] J. Radun, V. Hongisto, i M. Suokas, „Variables associated with wind turbine noise annoyance and sleep disturbance”, *Build Environ*, t. 150, s. 339–348, mar. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.12.039.
- [112] D. S. Michaud, L. Marro, i J. Mcnamee, „Derivation and application of a composite annoyance reaction construct based on multiple wind turbine features”, *Canadian Journal of Public Health*, t. 109, s. 242–251, 2018, doi: 10.17269/s41997-018-0040-y.
- [113] G. Hübner *i in.*, „Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: A comparison of U.S. and European samples”, *Environ Int*, t. 132, s. 105090, lis. 2019, doi: 10.1016/J.ENVINT.2019.105090.
- [114] International Organization for Standardization, „ISO/TS 15666:2021 - Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys”, 2021.

- [115] J. M. Fields *i in.*, „STANDARDIZED GENERAL-PURPOSE NOISE REACTION QUESTIONS FOR COMMUNITY NOISE SURVEYS: RESEARCH AND A RECOMMENDATION”, *J Sound Vib*, t. 242, nr 4, s. 641–679, maj 2001, doi: 10.1006/JSVI.2000.3384.
- [116] T. Gjestland, „Standardized general-purpose noise reaction questions”, w *12th ICBen Congress on Noise as a Public Health Problem*, 2017.
- [117] C. H. Huang i E. Seto, „Estimates of population highly annoyed from transportation noise in the United States: An unfair share of the burden by race and ethnicity”, *Environ Impact Assess Rev*, t. 104, s. 107338, sty. 2024, doi: 10.1016/J.EIAR.2023.107338.
- [118] T. Kageyama, T. Yano, S. Kuwano, S. Sueoka, i H. Tachibana, „Exposure-response relationship of wind turbine noise with self-reported symptoms of sleep and health problems: A nationwide socioacoustic survey in Japan.”, *Noise Health*, t. 18, nr 81, s. 53–61, 2016, doi: 10.4103/1463-1741.178478.
- [119] B. Schäffer *i in.*, „Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study.”, *J Acoust Soc Am*, t. 139, nr 5, s. 2949, maj 2016, doi: 10.1121/1.4949566.
- [120] B. Schäffer, R. Pieren, U. Wissen Hayek, N. Biver, i A. Grêt-Regamey, „Influence of visibility of wind farms on noise annoyance – A laboratory experiment with audio-visual simulations”, *Landsc Urban Plan*, t. 186, s. 67–78, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.01.014>.
- [121] E. Pedersen i P. Larsman, „The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines”, *J Environ Psychol*, t. 28, nr 4, s. 379–389, grudz. 2008, doi: 10.1016/J.JENVP.2008.02.009.
- [122] A. Freiberg, C. Scheffer, J. Hegewald, i A. Seidler, „The influence of wind turbine visibility on the health of local residents: a systematic review”, *Int Arch Occup Environ Health*, t. 92, nr 5, s. 609–628, sty. 2019, doi: 10.1007/s00420-019-01403-w.
- [123] J. D. Lane, P. L. Bigelow, S. E. Majowicz, i R. S. McColl, „Impacts of Industrial Wind Turbine Noise on Sleep Quality: Results From a Field Study of Rural Residents in Ontario, Canada.”, *J Environ Health*, t. 79, nr 1, s. 8–12, lip. 2016.
- [124] D. S. Michaud *i in.*, „Effects of Wind Turbine Noise on Self-Reported and Objective Measures of Sleep”, *Sleep*, t. 39, nr 1, s. 97–109, 2016, doi: 10.5665/sleep.5326.
- [125] The Working Group on Noise from Wind Turbines, *ETSU-R-97 The Assessment & Rating of Noise from Wind Farms*. Department of Trade and Industry, 1996.
- [126] Institute of Acoustics, „A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise. Supplementary guidance note 1: data collection.”, 2014.

-
- [127] S. Fichna, T. Biberger, B. U. Seeber, i S. D. Ewert, „Effect of Acoustic Scene Complexity and Visual Scene Representation on Auditory Perception in Virtual Audio-Visual Environments”, *2021 Immersive and 3D Audio: From Architecture to Automotive, I3DA 2021*, cze. 2021, doi: 10.1109/I3DA48870.2021.9610916.
- [128] W. C. Badawcze, I. Z. i Ochrony Konsumentów, F. Anfosso-Lédée, M. Paviotti, i S. Kephelopoulos, *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU): to be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC*. Publications Office, 2012. doi: doi/10.2788/32029.
- [129] B. Plovsing, „Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction”, *Delta*, s. 1–127, 2001.
- [130] C. Zhang *i in.*, „Experimental and numerical study on noise reduction of airfoil with the bioinspired ridge-like structure”, *Applied Acoustics*, t. 203, s. 109190, luty 2023, doi: 10.1016/j.apacoust.2022.109190.
- [131] S. Oerlemans, *Wind turbine noise: primary noise sources*. National Aerospace Laboratory NLR, 2011. Dostęp: 28 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: www.nlr.nl
- [132] S. Oerlemans, M. Fisher, T. Maeder, i K. Kogler, „Reduction of Wind Turbine Noise Using Optimized Airfoils and Trailing-Edge Serrations”, *Aiaa Journal - AIAA J*, t. 47, s. 1470–1481, 2009, doi: 10.2514/1.38888.
- [133] S. Oerlemans, *Wind turbine noise: primary noise sources*. National Aerospace Laboratory NLR, 2011.
- [134] K. Hansen, R. Kelso, i C. Doolan, „Reduction of Flow Induced Tonal Noise Through Leading Edge Tubercle Modifications”, w *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (31st AIAA Aeroacoustics Conference)*, 2010. doi: 10.2514/6.2010-3700.
- [135] M. Maizi, M. H. Mohamed, R. Dizene, i M. C. Mihoubi, „Noise reduction of a horizontal wind turbine using different blade shapes”, *Renew Energy*, t. 117, s. 242–256, mar. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.10.058.
- [136] K. Windhofer, A. Kari, K. Prenninger, i S. Lange, „Assessment of noise attenuating powertrain components”, *Forsch Ingenieurwes*, t. 85, s. 1–13, 2021, doi: 10.1007/s10010-021-00448-z.
- [137] B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing Sixth Edition*. 2013.
- [138] J. W. Hall, M. P. Haggard, i M. A. Fernandes, „Detection in noise by spectro-temporal pattern analysis”, *J Acoust Soc Am*, t. 76, nr 1, s. 50–56, lip. 1984, doi: 10.1121/1.391005.

- [139] M. P. Haggard, J. W. Hall, i J. H. Grose, „Comodulation masking release as a function of bandwidth and test frequency”, *J Acoust Soc Am*, t. 88, nr 1, s. 113–118, lip. 1990, doi: 10.1121/1.399956.
- [140] J. Cai, J. Liu, N. Yu, i B. Liu, „Effect of water sound masking on perception of the industrial noise”, *Applied Acoustics*, t. 150, s. 307–312, lip. 2019, doi: 10.1016/J.APACOUST.2019.02.025.
- [141] R. M. Schafer, *The Tuning of the World*. w Borzoi book. Knopf, 1977.
- [142] M. Southworth, „The Sonic Environment of Cities”, *Environ Behav*, t. 1, nr 1, s. 49–70, 1969, doi: 10.1177/001391656900100104.
- [143] E. Pedersen i K. Persson Waye, „Audio-visual reactions to wind turbines”, *Acta Acustica (Stuttgart)*, t. 89, nr SUPP., 2003, Dostęp: 8 marzec 2024. [Online]. Dostępne na: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hh:diva-37946>
- [144] F. van den Berg, E. Pedersen, J. Bouma, i R. Bakker, „Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents - Final report”, nr 044628, s. 1–99, 2008, Dostęp: 8 marzec 2024. [Online]. Dostępne na: <https://research.rug.nl/en/publications/project-windfarmperception-visual-and-acoustic-impact-of-wind-tur>
- [145] T. Van Renterghem, E. Vermandere, i M. Lauwereys, „Road traffic noise annoyance mitigation by green window view: Optimizing green quantity and quality”, *Urban For Urban Green*, t. 88, s. 128072, paź. 2023, doi: 10.1016/j.ufug.2023.128072.
- [146] K. Sun, B. De Coensel, G. M. Echevarria Sanchez, T. Van Renterghem, i D. Botteldooren, „Effects of human factors on the interaction between visual scene and noise annoyance”, *INTER-NOISE 2017 - 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Taming Noise and Moving Quiet*, t. 2017-Janua, 2017.
- [147] K. Sun, B. De Coensel, G. M. Echevarria Sanchez, T. Van Renterghem, i D. Botteldooren, „Effects of sound source visibility on sound perception in living room environment”, *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future*, s. 2004–2009, 2016.
- [148] K. Sun, B. De Coensel, G. M. Echevarria Sanchez, T. Van Renterghem, i D. Botteldooren, „Effect of interaction between attention focusing capability and visual factors on road traffic noise annoyance”, *Applied Acoustics*, t. 134, s. 16–24, maj 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.01.001.
- [149] JASP Team, „JASP (Version 0.95.1) [Oprogramowanie]”, 2025. [Online]. Dostępne na: <https://jasp-stats.org/>
- [150] F. Faul, E. Erdfelder, A. G. Lang, i A. Buchner, „G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences”, *Behav Res Methods*, t. 39, nr 2, s. 175–191, 2007, doi: 10.3758/BF03193146/METRICS.

- [151] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, „Generalny Pomiar Ruchu 2020/2021, Średni Dobowy Ruch Roczny (SDRR) w punktach pomiarowych w GPR 2020/21 na drogach krajowych”, Warszawa, 2022.
- [152] World Meteorological Organization (WMO), „Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)”, Geneva, 2023.
- [153] X. Qiu, „Acoustic testing and evaluation of textiles for buildings and office environments”, *Performance Testing of Textiles: Methods, Technology and Applications*, s. 103–128, cze. 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100570-5.00006-2.
- [154] J. Ledolter i R. H. Kardon, „Focus on Data: Statistical Design of Experiments and Sample Size Selection Using Power Analysis”, *Invest Ophthalmol Vis Sci*, t. 61, nr 8, s. 11, lip. 2020, doi: 10.1167/IOVS.61.8.11.
- [155] G. T. Fechner, *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel, 1860.
- [156] J. Peirce *i in.*, „PsychoPy2: Experiments in behavior made easy”, *Behav Res Methods*, t. 51, nr 1, s. 195–203, luty 2019, doi: 10.3758/s13428-018-01193-y.
- [157] „Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D, VR & AR Engine”. Dostęp: 18 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://unity.com/>
- [158] J. F. Palmer, „Deconstructing viewshed analysis makes it possible to construct a useful visual impact map for wind projects”, *Landsc Urban Plan*, t. 225, s. 104423, wrz. 2022, doi: 10.1016/j.landurbplan.2022.104423.
- [159] J. Felcyn, A. Preis, M. Praszowski, i M. Wrzosek, „Assessment of audio-visual environmental stimuli. Complementarity of comfort and discomfort scales”, *Archives of Acoustics*, t. 46, nr 2, s. 279–288, 2021, doi: 10.24425/AOA.2021.136582.
- [160] „HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone”. Dostęp: 17 kwiecień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- [161] A. Rosciszewska *i in.*, „Cognitive neuroscience approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions”, *Humanit Soc Sci Commun*, t. 12, nr 1, s. 296, 2025, doi: 10.1057/s41599-025-04645-x.
- [162] Hojan Edward, *Protetyka słuchu*, 1. wyd. Wydawnictwo UAM, 2014.
- [163] P. D. Trapnell i J. D. Campbell, „Rumination-Reflection Questionnaire”, *PsycTESTS Dataset*, grudz. 2011, doi: 10.1037/T07094-000.
- [164] I. H. Robertson, T. Manly, J. Andrade, B. T. Baddeley, i J. Yiend, „«Oops!»: performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects”, *Neuropsychologia*, t. 35, nr 6, s. 747–758, maj 1997, doi: 10.1016/S0028-3932(97)00015-8.

- [165] G. Chierchia, D. Fuhrmann, L. J. Knoll, B. P. Pi-Sunyer, A. L. Sakhardande, i S. J. Blakemore, „The matrix reasoning item bank (MaRs-IB): novel, open-access abstract reasoning items for adolescents and adults”, *R Soc Open Sci*, t. 6, nr 10, 2019, doi: 10.1098/RSOS.190232.
- [166] P. F. Lovibond i S. H. Lovibond, „The structure of negative emotional states: comparison of the Depression Anxiety Stress Scales (DASS) with the Beck Depression and Anxiety Inventories”, *Behaviour research and therapy*, t. 33, nr 3, s. 335–343, 1995, doi: 10.1016/0005-7967(94)00075-U.
- [167] J. W. Hall, M. P. Haggard, i M. A. Fernandes, „Detection in noise by spectro-temporal pattern analysis”, *Citation: The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 76, s. 50, 1984, doi: 10.1121/1.391005.
- [168] K. Bolin, „Wind Turbine Noise and Natural Sounds : Masking, Propagation and Modeling”, 2009.
- [169] K. Bolin, „Masking of wind turbine sound by ambient noise”, 2006.
- [170] B. Schäffer, R. Pieren, U. Wissen Hayek, N. Biver, i A. Grêt-Regamey, „Influence of visibility of wind farms on noise annoyance – A laboratory experiment with audio-visual simulations”, *Landsc Urban Plan*, t. 186, s. 67–78, cze. 2019, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2019.01.014.
- [171] Z. Bangjun, S. Lili, i D. Guoqing, „The influence of the visibility of the source on the subjective annoyance due to its noise”, *Applied Acoustics*, t. 64, nr 12, s. 1205–1215, grudz. 2003, doi: 10.1016/S0003-682X(03)00074-4.
- [172] A. Haapakangas, V. Hongisto, i D. Oliva, „Audio-visual interaction in perception of industrial plants – Effects of sound level and the degree of visual masking by vegetation”, *Applied Acoustics*, t. 160, s. 107121, mar. 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.107121.
- [173] P. Matecki *i in.*, „Does Stochastic and Modulated Wind Turbine Infrasound Affect Human Mental Performance Compared to Steady Signals without Modulation? Results of a Pilot Study”, *Int J Environ Res Public Health*, t. 20, nr 3, s. 2223, luty 2023, doi: 10.3390/IJERPH20032223/S1.
- [174] N. S. Marshall *i in.*, „The Health Effects of 72 Hours of Simulated Wind Turbine Infrasound: A Double-Blind Randomized Crossover Study in Noise-Sensitive, Healthy Adults”, *Environ Health Perspect*, t. 131, nr 3, mar. 2023, doi: 10.1289/EHP10757/SUPPL_FILE/EHP10757.S001.ACCO.PDF.
- [175] C. Dunbar *i in.*, „EEG power spectral responses to wind farm compared with road traffic noise during sleep: A laboratory study”, *J Sleep Res*, t. 31, nr 3, cze. 2022, doi: 10.1111/JSR.13517.

- [176] D. S. Michaud *i in.*, „Effects of Wind Turbine Noise on Self-Reported and Objective Measures of Sleep”, *Sleep*, t. 39, nr 1, s. 97–109, sty. 2016, doi: 10.5665/SLEEP.5326.
- [177] R. J. McCunney, K. A. Mundt, W. D. Colby, R. Dobie, K. Kaliski, i M. Blais, „Wind turbines and health A Critical Review of the Scientific Literature”, *J Occup Environ Med*, t. 56, nr 11, s. e108–e130, lis. 2014, doi: 10.1097/JOM.0000000000000313.
- [178] D. S. Michaud *i in.*, „Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise”, *J Acoust Soc Am*, t. 139, nr 3, s. 1467–1479, mar. 2016, doi: 10.1121/1.4942402.
- [179] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, i J. Bouma, „Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound”, *Energy Policy*, t. 38, nr 5, s. 2520–2527, maj 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.01.001.

Załączniki

Załączniki do rozprawy stanowią artykuły:

1. Rościszewska, A., Buszkiewicz, M.J., Dobrzynska-Kobylec, G., i in. 2025. Cognitive neuroscience approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions. *Humanities & Social Sciences Communications* 12, 1–18.
2. Buszkiewicz, M.J., Wicher, A.J., i Pyffel, R. 2023. Method for determining the threshold of wind turbine noise masking by highway noise as function of distance. *Proceedings of Forum Acusticum 2023 : 10th Convention of EAA, European Acoustics Association*, 3091–3095.







ARTICLE



<https://doi.org/10.1057/s41599-025-04645-x>

OPEN

Cognitive neuroscience approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions

Agnieszka Rosciszewska ^{1,2✉}, Maciej Buszkiewicz³, Gabriela Dobrzynska-Kobylec³, Anna Klichowska ^{1,4}, Tomasz Przybyla ^{1,2}, Blanka B. Nagy^{1,5}, Andrzej Wicher^{1,3} & Michal Klichowski ^{1,2✉}

Despite their alignment with sustainable development principles, wind farms often provoke controversy and misinformation, particularly regarding the noise they produce and their potential impact on human functioning. Concerns have been raised about the possible effects of this noise on irritation levels, psychological well-being, and cognitive functioning. Yet, there is still a lack of controlled, comprehensive studies that could substantiate these concerns. Here, a cognitive neuroscience approach is proposed to experimentally and multifactorial explore wind turbine noise's impact on various mental functions. We used recordings from an actual wind turbine to investigate its effects on the dynamics of brain waves crucial for complex cognitive tasks, as well as on sustained attention and inductive reasoning in healthy adult volunteers. We also tested the subjective evaluation of the stress induced by wind turbine noise and the annoyance it causes. Control conditions included silence and road traffic noise (participants were blind to the nature of acoustic variables). The findings of this pilot study reveal that short-term exposure to wind turbine noise with a sound pressure level corresponding to the real-world situation (i.e., 65 dB SPL) does not adversely affect any of the examined cognitive functions and is not perceived as more stressful or bothersome than road traffic noise. Furthermore, we utilized various psychological scales and found that even tendencies towards rumination or reduced capacity for reflection and ambiguity tolerance did not lead to maladaptive perceptions of wind turbine noise and, therefore, to a state that might indirectly influence mental functioning. Although these results cannot be generalized, they support the concept that the interlinkage between exposure to wind turbine noise and human cognitive functioning is not a cause-and-effect relationship. We discuss the mediating role of socially constructed beliefs about wind farms in this interrelation. We also indicate how important the use of a cognitive neuroscience approach in future research may be for an objective assessment of the impact of wind farms on human cognition.

¹Cognitive Neuroscience Center, Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland. ²Learning Laboratory, Faculty of Educational Studies, Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland. ³Department of Acoustics, Faculty of Physics and Astronomy, Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland. ⁴Department of Child Pedagogy, Faculty of Educational Studies, Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland. ⁵Neurocognitive Psychology Program, Carl von Ossietzky University of Oldenburg, Oldenburg, Germany. ✉email: agnieszka.roszczewska@amu.edu.pl; michal.klichowski@amu.edu.pl

Introduction

Noise, a pervasive environmental stressor, has been demonstrated to adversely affect human functioning, encompassing physiological and psychological processes, as well as the neuronal mechanisms underpinning behavior and the execution of cognitive tasks. Consequently, noise has emerged as a significant public health concern worldwide, with its influence on human functioning, particularly mental functioning, becoming a focal point of rigorous scientific investigation (Jafari et al., 2019; Liang et al., 2024). A synthesis of these studies reveals that individuals exposed to elevated noise levels undergo adverse psychophysiological changes (primarily felt as an increase in annoyance), often culminating in disturbances in cognitive functioning. These disturbances may manifest as diminished effectiveness in performing tasks requiring concentrated attention, storing information in working memory, or problem-solving within the reasoning process (Astuti et al., 2023; Muller et al., 2023; Pieper et al., 2021). In other words, such mechanisms as subjective noise annoyance assessment controls, in a way, the impact of noise on mental processes. A prevalent source of noise capable of influencing cognitive abilities in this manner is, for example, the noise generated by air conditioners. Research indicates that impulsive sounds produced by air conditioners can elicit physiological responses, subsequently impacting cognition (Soeta and Onogawa, 2023). In recent years, novel noise sources have emerged, and their impact on diverse cognitive functions remains largely uncharted. Nonetheless, systematic research suggests that certain new noises can be highly disruptive. An example of this is the noise generated by drones, which research suggests is considerably more annoying than other typical environmental noise sources and is poorly masked by ambient noise (Alkmim et al., 2022; Schaffer et al., 2021; Torija and Nicholls, 2022).

In the context of some new noises, various misleading or fake information have surfaced, insinuating that such noises may possess a certain uniqueness that impairs cognition. A case in point is the noise from wind turbines. Despite the development of wind farms being a pivotal element of the global energy transformation and numerous countries investing in this technology to increase the share of renewable energy sources in their energy mix and reduce greenhouse gas emissions, the social perception of wind farms is markedly diverse (Davy et al., 2020; Hanning and Evans, 2012). They are often negatively evaluated, for instance, as overly intrusive in the landscape, insufficiently contributing to the development of the local community residing near the farm, and as a source of noise that is purported to affect life detrimentally, including impairing cognitive functioning, particularly concentration efficiency (Hansen and Hansen, 2020; Lundheim et al., 2022; Takeuchi, 2023). This phenomenon has been informally termed *wind turbine syndrome* (Pierpont, 2009), yet its actual etiology has never been described. As a result, conspiracy slogans or internet posts are often disseminated suggesting that, for example, wind turbine noise could limit learning effectiveness in nearby schools or constrain mental processes conducted in local homes or workplaces. Since there are no controlled and comprehensive studies on these issues (Clark and Paunovic, 2018; van Kamp and van den Berg, 2021; cf. Pleban et al., 2024), the degree to which these claims reflect reality remains a matter for further investigation (Marshall et al., 2023).

Prior studies into the influence of wind turbine noise on the comprehensive spectrum of human functionality have yielded diverse outcomes, some of which remain equivocal, contributing to a non-comprehensive or inconsistent body of evidence. This is particularly relevant to health issues, where numerous investigations have examined the impact of wind turbine noise on various aspects of health-related quality of life (Shepherd et al., 2011),

such as cardiovascular functioning or sleep efficiency (Ageborg Morsing et al., 2018; Michaud et al., 2025; Smith et al., 2020). The only relatively consistent research results pertain to the increase in annoyance levels among people living near wind farms and the generally high annoyance ratings attributed to wind turbine noise (Ramalho et al., 2025; van Kamp and van den Berg, 2021). For instance, for equivalent day-evening-night noise levels, wind turbine noise is rated as the most annoying, followed by aircraft noise, then road noise, with railroad noise being the least annoying (Janssen et al., 2011). Consequently, it is often posited that annoyance (which has negative consequences for cognitive functioning) is the sole health risk factor associated with wind turbine noise (Radun et al., 2022). Nonetheless, the reasons for this increase in annoyance remain unclear.

One of the common hypothetical explanations of annoyance caused by wind turbine noise may be related to acoustic characteristics. This noise differs from other environmental noises (e.g., traffic, trains, air traffic), particularly in terms of sound level changes over time and spectral structure. A distinguishing feature of wind turbine noise is the periodicity of level changes, known as amplitude modulation. The noise level of a wind turbine periodically decreases and increases within a range of about 4 dB. This change occurs at an average frequency of about 0.5 Hz to 2 Hz, although it can sometimes reach up to 4 Hz (Ioannidou et al., 2016). It is argued that the amplitude modulation of wind turbine noise is the most significant factor determining the detection of this sound against other noises and the effect on the degree of annoyance (Hafke-Dys et al., 2016). The greater the change in sound level over time (modulation depth), the greater the annoyance caused by wind turbine noise. In terms of spectral structure, when comparing the sound spectra of road traffic noise and wind turbine noise expressed in dB SPL, in both cases, there is a large proportion of acoustic energy in the low-frequency range (<200 Hz) (see Fig. 2a in “Methods”). However, despite the high sound pressure levels in the low-frequency range, especially in the infrasound range (up to 20 Hz), this band does not play a significant role in the perception of wind turbine and road traffic noise sounds (van Kamp and van den Berg, 2021; Yokoyama et al., 2014). On the other hand, when analyzing the spectra of wind turbine and road noise, taking into account the correction curve A (dBA), it can be seen that for road traffic noise, the energy maximum clearly falls in the 1 kHz frequency band (Okada et al., 2020). In contrast, a clear maximum does not occur for wind turbine noise, but the band’s energy from 400 to about 1600 Hz is dominant (Fig. 2a). The amplitude modulation is likely the largest contributor to the annoyance rating of wind turbine noise, the occurrence of which causes an unmasking effect compared to other types of environmental noise (Hafke-Dys et al., 2016).

However, a growing body of literature suggests that the assessed annoyance is less strongly linked to the acoustic characteristics of wind turbine noise than previously believed. This has led to the formulation of an alternative hypothesis, proposing that the source of annoyance is rooted in non-acoustic variables (McCunney et al., 2014; Schmidt and Klokke, 2014), or, as a very recent questionnaire-based study suggests (Ata Teneler and Hassoy, 2024), in the interaction of acoustic factors with non-acoustic variables. These variables may be associated with visual phenomena, such as the visibility of wind turbines or shadow flicker (Hubner et al., 2019; Knopper and Ollson, 2011; Szychowska et al., 2018; van Kamp and van den Berg, 2021; Voicescu et al., 2016), but primarily with socially constructed attitudes and expectations or certain psychological conditions (Miedema and Vos, 2003; Pohl et al., 2018; Schaffer et al., 2016). As shown by the latest systematic review (Obuseh et al., 2025), social contexts,

such as misinformation about the impact of wind turbines on human functioning, may play a major role here. It is also postulated that potential adverse physical and mental responses emerge solely among individuals with a negatively oriented personality, exhibiting, for instance, high levels of neuroticism, negative affect, and intolerance to frustration (Taylor et al., 2013). The importance of such personality characteristics for wind turbine noise perception was demonstrated in a rapid evidence review covering 2020–2024 (Woodland et al., 2024). Moreover, a systematic literature review including publications from 1998–2022 (Ramalho et al., 2025) shows no empirical evidence proving a cause-and-effect relationship between wind turbine noise and health, suggesting the presence of moderating social and psychological factors. Thus, within the framework of this hypothesis, it is conjectured that wind turbine noise does not exert a genuine (direct) negative impact on human functioning in a broad sense (Michaud et al., 2016). This could be, in essence, a nocebo effect, where the dissemination of inaccurate information through social conversations and media reports can build artificial adverse symptoms, especially in psychologically sensitive people (Clark et al., 2020; Crichton and Petrie, 2015; Schaffer et al., 2016; Smith et al., 2020). However, recent discussions (e.g., Michaud et al., 2025; Woodland et al., 2024) have noted that due to the non-interventional and opinion-based nature of most studies to date, as well as inconsistent and poor-quality evidence, it is impossible to conclude whether the impact of wind turbine noise on physical-mental health is objective or merely a socio-culturally constructed stressor.

In light of the literature reviewed above, and bearing in mind the importance of renewable energy and the development of wind farms (Brouwer et al., 2025; le Maitre et al., 2024; Martinez and Iglesias, 2024), it seems that a new approach is needed in research on the impact of wind turbine noise on human functioning (Michaud et al., 2025; Rabbani et al., 2025). Such an approach should allow for a more objective and comprehensive assessment of this impact. It may limit the role of misinformation in decision-making or opinion-forming and increase the share of evidence in discussions among stakeholder groups, such as residents, policymakers, and energy developers (Brouwer et al., 2025; Tsionas et al., 2025). Against this background, this work proposes a novel approach to explore the impact of wind turbine noise on various mental functions by applying cognitive neuroscience techniques and tenets that current traditional approaches have missed (Boone and Piccinini, 2016; Ilardi and Feldman, 2001). Apart from describing the assumptions of such a unique approach, we attempted to apply it in a pilot study with three research questions. The first question is whether exposure to wind turbine noise significantly changes mental functioning when tested by recording brain activity and objective measurements of cognitive processes. The second question explores whether wind turbine noise is perceived as bothersome and stressful when highly ecologically valid conditions and blinding procedures are used. The last question is whether noise-induced annoyance levels are proportional to the participants' personality traits measured by valid psychological tools. Based on the results, we scrutinize the interlinkage between exposure to wind turbine noise and human cognitive functioning. We also discuss how to further develop a proposed cognitive neuroscience approach to advance research on the wind industry's impact on human cognition.

Methods

Approach and hypotheses. The proposed approach includes several minimum criteria for the research procedure. These guidelines are derived from methodological assumptions in the interdisciplinary field of cognitive neuroscience and the literature

review on the psychophysical consequences of exposure to wind turbine noise. Firstly, the study should be highly controlled and allow for manipulation of the independent variable (noise exposure). Therefore, it should take the form of laboratory-based experiments. Additionally, such an experiment should explore both behavioral effects (using recognized and standardized psychological methods) and directly record responses from the nervous system, e.g., through electroencephalography or other brain activity imaging techniques (Basner et al., 2014). Secondly, such a study must also demonstrate high ecological validity (Klichowski and Kroliczak, 2020), i.e., resemble real-world scenarios of wind turbine noise exposure (Alamir et al., 2019). Using a somewhat artificial model, i.e., laboratory-based experiments, this would be evident in the use of actual recordings of wind turbine noise at volumes characteristic of natural situations as acoustic stimuli, unlike the majority of past research where synthetic sounds were used (Maijala et al., 2021). Simultaneously, the recordings must be clean in that they are not contaminated by other noises, such as sounds from a nearby highway, which often occurred in previous studies (McKenna et al., 2025). Furthermore, ecological validity should be ensured by measuring cognitive components associated with everyday mental tasks (e.g., fluid intelligence, problem-solving) rather than tasks abstracted from daily life (Malecki et al., 2023). Thirdly, it is crucial to consider the psychological conditions (characteristics) that render wind turbine noise more bothersome and stressful using standardized psychological tests. The study should also be organized so that the examinee is unaware of the nature of the sound (i.e., blinding) and non-focused listening is employed (Alamir et al., 2019; Szychowska et al., 2018; Turi et al., 2019). Finally, it is imperative to confirm that all participants exhibit standard auditory perception across an extensive frequency spectrum, noting that traditional audiological examinations rarely assess hearing sensitivity below 250 Hz, thereby overlooking a significant frequency domain when evaluating the impact of wind turbine noise (Alamir et al., 2019; Yonemura and Sakamoto, 2025).

Here, we conducted a pilot study for such a complex cognitive neuroscience experiment. Employing a baseline-intervention design and recordings from an actual wind turbine (with the sound pressure levels corresponding to the real situation in which a person residing at a distance of several hundred meters from sources), we compared how the dynamics of brain waves crucial for complex cognitive tasks and the effectiveness of sustained attention and inductive reasoning change under short-term exposure to wind turbine noise. Note that sustained attention plays a crucial role in everyday learning and working, and that in everyday life most reasoning is inductive (Cowley, 2018; Hayes and Heit, 2017). We also examined the level of such changes when exposed to road traffic noise and in the absence of any noise. Additionally, we tested the subjective evaluation of noise-induced annoyance and stress while controlling the participants' hearing. We correlated these results with the diagnosed levels of such psychological characteristics in the participants as ambiguity tolerance, rumination, and reflection, i.e., variables moderating the adaptation process (or lack thereof) to new, atypical conditions (Thalbourne and Houran, 2000; Thomsen et al., 2013). Importantly, we only revealed the nature of sounds during debriefing. Thus, participants did not know what they heard, i.e., the procedure was blind.

We defined three hypotheses to predict the potential answers to the three research questions mentioned in the introduction: (i) The exposure to wind turbine and road traffic noise would elicit significant changes in cognitive functioning, both at behavioral and neuronal levels, compared to a control group operating in silence. Specifically, the noise-exposed groups would deteriorate

in cognitive performance, while the control group might exhibit stability or even improvement. Hypothesis 1 thus refers to the theoretical assumption described earlier that individuals exposed to noise undergo adverse psychophysiological changes (primarily felt as an increase in annoyance), often culminating in diminished effectiveness in performing tasks requiring concentrated attention or problem-solving within the reasoning process (Astuti et al., 2023; Muller et al., 2023; Pieper et al., 2021). (ii) Wind turbine noise would be perceived as more bothersome and stressful than road traffic noise, thereby inducing more pronounced negative changes. Hypothesis 2 is based on research findings indicating the generally high annoyance ratings attributed to wind turbine noise (Ramalho et al., 2025; Radun et al., 2022; van Kamp and van den Berg, 2021), and that for equivalent noise levels, wind turbine noise is rated as more annoying than road noise (Janssen et al., 2011). (iii) The perceived annoyance and stress from wind turbine noise would be inversely proportional to the participant's tolerance for ambiguity and reflectiveness and directly proportional to their tendency for rumination. In other words, individuals with less adaptive strategies for perceiving new situations and a higher propensity for neurotic self-focused thoughts would be expected to find wind turbine noise more annoying and stressful. Hypothesis 3 thus relates to the concept that non-acoustic variables, such as psychological traits stimulating negative responses to unusual stimuli, like intolerance to frustration or epistemic self-focused thoughts, cause maladaptive perceptions of wind turbine noise (Obuseh et al., 2025; Pohl et al., 2018; Schaffer et al., 2016; Taylor et al., 2013; Woodland et al., 2024).

Participants. In order to determine the minimum sample size necessary for this pilot study, an a priori power analysis was conducted for a mixed-model 2×3 ANOVA. This analysis included the within-subject factor of time (comprising the baseline/initial phase of the study and the intervention/second phase) and the between-subject factor of the group (encompassing wind turbine noise, road traffic noise, and silence). The investigation was performed using *G*Power* for Mac (Version 3.1.9.6). The results indicated that a total of 42 participants are needed to demonstrate a medium effect size (f) of 0.25, with a Type I error (α) of 0.05 and a Type II error (β) of 0.20 ($1-\beta/\text{power} = 0.80$), and, therefore, to achieve the power of 80%, typically sought in behavioral sciences (Cohen, 1988; Tomczak et al., 2014). Consequently, 45 volunteers were recruited.

As is typical for basic laboratory cognitive neuroscience experiments (particularly those beginning a broader research program or a cycle of full-scale studies), the participants were healthy university students (30 females, 15 males, recruited via university website, email, and snowball sampling), aged between 18 and 25 years (mean=22.47, SD = 1.63). Thus, they were mature individuals who were not yet subject to aging processes and had a lengthy educational background. It is important to note that a previous study (Miedema and Vos, 1999) indicated that age is a factor that modifies the evaluation of noise annoyance. However, there is no linear relationship; instead, it has a curvilinear shape, meaning that relatively young (<20) and relatively old (>60) individuals report less annoyance than people between 20 and 60 years old. Moreover, a recent literature review (Ni and Huang, 2022) showed that noise-induced annoyance increases with age, peaking at around 18 years and then declining until approximately 30 years, after which it stabilizes, albeit with a continued gradual decline. Consequently, the participants in our study belong to the age group that is typically the most sensitive to noise compared to other age groups. Regarding education, individuals with higher education levels feel relatively more

annoyed. Therefore, our group should be characterized by a sensitivity to noise annoyance (although we had a few people just starting their university studies). As such, similar exposure to wind turbine noise as in our experiment would not cause higher annoyance in younger or older individuals and those with lower education levels. In other studies on the impact of noise on human functioning, an analogous selection of the research sample was used, both in the decision on the size and in the recruitment of volunteers from the university student population (for a recent example, see Yonemura and Sakamoto, 2025 and Zhang et al., 2024).

Eligibility was determined using a brief questionnaire to ensure that they met the inclusion criteria (e.g., being of legal age, having university student status) and did not meet any of the exclusion criteria (e.g., having severe head injuries or undergone ear surgery, experiencing dizziness or tinnitus). All participants reported having normal or corrected-to-normal vision abilities and no history of neurological disorders or severe head injuries. Additionally, they declared not to use any medication that could affect the functioning of the nervous system, not to have used psychoactive substances within 24 h prior to the experiment, and not to have consumed caffeine on the day of the examination. Furthermore, all individuals have self-declared normal hearing abilities, which were corroborated by three auditory assessments: audiometry, otoacoustic emissions, and tympanometry. Audiometric measurements of participants' hearing thresholds were performed for frequencies in the 0.125–8 kHz range using an AC40 Interacoustics audiometer. The measurement frequencies were 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6 and 8 kHz. The study participants' mean hearing thresholds in the 0.125–8 kHz frequency range were 3 dB HL and did not exceed 25 dB HL for each frequency. The measured SNR (signal-to-noise ratio) values of DP (distortion product) otoacoustic emission were 21 dB SPL. Tympanometry results showed Type A tympanograms in all participants. Before the study, participants were assured of anonymity and provided written informed consent. All 45 volunteers completed the study.

Procedure. Before the experiment commenced, all volunteers were required to complete a digital questionnaire at home, which included a demographic survey, the Tolerance of Ambiguity Scale, and the Rumination-Reflection Questionnaire. Then, irrespective of their responses, they were randomly allocated to one of the groups: (1) exposed to the noise of road traffic, (2) subjected to the wind turbines noise, or (3) a group in which participants performed all tasks in silence. We used a gender-balanced approach – the same number of females ($n = 10$) and males ($n = 5$) were in each group. The groups did not differ in mean age ($F_{2,42} = 0.897$, $p = 0.416$). We used a between-groups study design to prevent carryover effects of the preceding sound to the following procedure, which can occur in a within-subjects study design.

The laboratory part of the study procedure (implemented in our Cognitive Neuroscience Center) was divided into two nearly identical phases, i.e., baseline/first section of the study and intervention/second section. Each section was initiated with a 10-min task involving reading a text on a tablet. More precisely, participants were asked to sit comfortably in an armchair and provided with a tablet (Galaxy Tab 4 10.1 LTE, SM-T535) displaying a popular science article in their native language. They were instructed to relax and read silently at their own pace until they were informed that the time was up. Subsequently, participants moved to a computer station (located in another laboratory room) where an EEG measurement was conducted, followed by two cognitive ability assessments: the Sustained

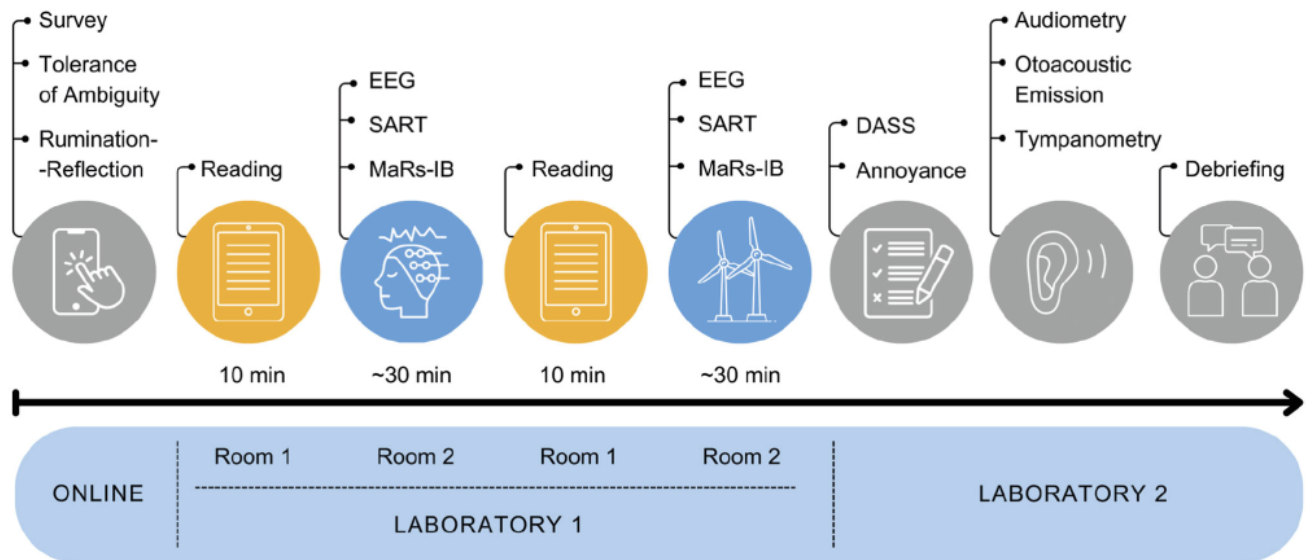


Fig. 1 Schematic overview of the study design. The experimental protocol commenced with participants completing an online demographic survey on the preceding days. This survey also included the Tolerance of Ambiguity Scale and the Rumination-Reflection Questionnaire. The study was initiated in the first room of the laboratory. Here, participants engaged in a 10-min reading session on a tablet device. Subsequently, they were relocated to an alternate (acoustically isolated) room. In this chamber, electroencephalogram (EEG) measurements were taken. This was followed by completing the Sustained Attention to Response Task (SART) and the Matrix Reasoning Item Bank test (MaRs-IB). EEG and both tests were conducted in silence. Participants then returned to the initial room and took a 10-min reading break. Following this, the EEG, SART, and MaRs-IB were conducted again. However, this time, some participants (randomly selected) did this with exposure to wind turbine noise ($n = 15$) and others with exposure to road traffic noise ($n = 15$) or in silence ($n = 15$). Participants in the wind turbine and road traffic noise conditions were required to complete two supplementary questionnaires on the subjective assessment of the auditory stimuli: the Depression, Anxiety and Stress Scale (DASS) and the Noise Annoyance Questionnaire. The final phase of the experiment took place in a psychoacoustic laboratory, where participants' auditory capabilities were assessed using audiometry, otoacoustic emission testing, and tympanometry. The experimental procedure concluded with a debriefing session, during which the nature of the auditory stimuli was disclosed to the participants in the noise-exposed conditions.

Attention to Response Task and the Matrix Reasoning Item Bank test. After completing all tasks in the first section, they returned to the first room with an armchair to continue reading the article for another 10 min. Further, based on the assigned condition, they completed the remaining measurements and tasks from the second part of the study either in silence or while exposed to wind turbines or road traffic noise. Afterward, participants from the road traffic and wind turbine noise groups completed two additional pen-and-paper questionnaires related to the subjective assessment of the auditory stimuli used in the study: Depression, Anxiety and Stress Scale and Noise Annoyance Questionnaire. Finally, their hearing was evaluated using audiometry (Interacoustics AC40), otoacoustic emission testing, and tympanometry (Interacoustics Titan) in the psychoacoustic laboratory in our center's third room. The last element was a debriefing, during which we revealed the nature of sounds to participants from the noise-exposed groups.

It must be strongly emphasized that participants were not informed about the purpose of the noise exposure either before or during the experiment. They were only told that there might be some sound during the study. The participants did not know if or when the sound would occur, nor did they know what the sound would be (blinding). After the study, we asked the group exposed to wind turbine noise to name the sound. None identified it as wind turbine noise. Most provided general descriptions indicating it was some noise, and some participants specified that the sound reminded them of a noise generated by ocean waves or an airplane.

The research procedure was approved by The Ethics Committee of the Faculty of Educational Studies at Adam Mickiewicz University, Poznan, on December 12, 2022 (Ethical Approval No. WSE-KEdsPB-03/2022/2023) and adhered to the

principles of the Declaration of Helsinki. The overall workflow of our experimental design is visualized in Fig. 1, and all its relevant elements are described in the following subsections.

Tolerance of Ambiguity Scale. The Tolerance of Ambiguity Scale is comprised of 12 items, each presented as a statement. Respondents must indicate their level of agreement with each statement on a scale ranging from 1 (completely disagree) to 7 (completely agree). The instrument presupposes a unifactorial structure for ambiguity tolerance. Hence, the scoring is conducted by summing the points assigned to individual responses (note that seven items are reverse scored). A higher overall score on the scale (ranging from a minimum of 12 to a maximum of 84) indicates a greater tolerance of ambiguity (McQuarrie and Mick, 1992). Herein, ambiguity tolerance is conceptualized as the capacity to manage ambiguous situations, i.e., ones that cannot be adequately categorized. The scale thus gauges the degree to which an individual perceives ambiguous situations as desirable and their typical reactions to such situations. Individuals with low ambiguity tolerance typically exhibit aversion to undefined stimuli, whereas those with high ambiguity tolerance often respond to such stimuli with curiosity. Low ambiguity tolerance may elicit a sense of threat and limit engagement in atypical experiences, whereas high ambiguity tolerance may stimulate satisfaction and enhance activity (Thalbourne and Houran, 2000). Given that our study involved participants who are native speakers of Polish, we utilized the Polish adaptation of the Tolerance of Ambiguity Scale (Czajeczny, 2016).

Rumination-Reflection Questionnaire. The Rumination-Reflection Questionnaire is made up of 13 items. Individuals rate each item on a scale from 1 (completely disagree) to 5 (completely agree).

These 13 statements comprise six items diagnosing rumination (one item is reverse scored) and seven for reflectiveness (two are reverse-scored). The score is calculated by summing the points for each part. For rumination, one can receive from 6 to 30 points, and for reflectiveness, from 7 to 35 points. The higher the sum score, the more pronounced the characteristic (Trapnell and Campbell, 1999). These scales measure two types of thoughts that arise, for example, in new situations. Ruminations are maladaptive thoughts that unnecessarily consume a large part of cognitive resources and consequently hinder the performance of new tasks (they, of course, also have many other consequences). They are, therefore, a type of neurotic self-focused thoughts. On the other hand, reflectiveness refers to adaptive thoughts that open the mind to new experiences and facilitate the performance of cognitive tasks (and improve functioning in several other areas). Thus, these are epistemic self-focused thoughts (Thomsen et al., 2013). In our study, we used the Polish version of the Rumination-Reflection Questionnaire (Radon, 2014).

EEG. The power ratio of theta to beta frequencies (Theta/Beta Ratio, TBR) in spontaneous EEG is a widely recognized biomarker for cognitive control, where lower TBR indicates a higher level of attentional (Angelidis et al., 2016) and executive control (van Son et al., 2019), and cognitive processing (Clarke et al., 2019). Therefore, a decrease in TBR is indicative of an enhancement in cognitive functioning, whereas an increase in TBR suggests a decline in cognitive performance. To determine TBR, we collected the EEG signals using an amplifier (ProComp 2, Thought Technology) connected to a gold-plated active FCz electrode, adhering to the international standard 10-10 electrode placement system. Reference and ground electrodes were attached to the left and right earlobes, respectively. During the measurement, the impedance was kept below 5 k Ω for each channel, and the sampling frequency of the EEG signal was set at 256 Hz. We used the diagnostic protocol (built into BioGraph Infinity Software, Thought Technology), which consisted of three parts, each lasting 60 s. The first two parts were conducted in the resting state with the participant's eyes open and then closed. The last part involved the cognitive state, during which the participant was asked to silently read text displayed on the screen of a 21.5-in. Apple iMac computer, which was positioned ~57 cm away from the participant. Following the collection, the EEG signal was preserved for subsequent offline analysis. After removing eye and muscle artifacts, the signal was segmented into frequency bands based on the Fourier Transform with the range designated as 4–8 Hz for theta and 13–30 Hz for beta waves. Based on this, the TBR was computed individually for each segment and finally for the entire measurement duration.

Sustained Attention to Response Task. The Sustained Attention to Response Task (SART) was employed to measure participants' ability to sustain attention. This Go/No-Go task requires participants to react to and inhibit reactions to specific stimuli across 225 trials. During the initial 250 ms of each trial, either a Go stimulus, represented by digits from 1 to 9 excluding 3, or a No-Go stimulus, represented by the digit 3, is presented, followed by a mask (a diagonal cross inscribed in a ring) for 900 ms. The presentation of numbers is pseudo-randomized, with each digit appearing 25 times and never consecutively. The size of the white font displayed on a black screen is also randomized (48, 72, 94, 100, and 120 points). Participants are instructed to respond to Go stimuli by pressing the keyboard's spacebar and withhold their reaction when the digit 3 appears on the screen, emphasizing both accuracy and speed of responses equally. The test is preceded by a training session of 18 trials, including two No-Go trials. We used the online SART test on the Psytoolkit platform (version 3.4.4) for non-commercial research purposes (Stoet, 2010, 2017). One of

its advantages is the ability to edit the code provided on the website freely. Since the Psytoolkit's SART slightly differs from the original version, we made minor modifications to the code (removed the error message; the modified code is available in the Open Science Framework database: <https://osf.io/wpk4c>) to align it with the version developed by Robertson et al. (1997). We tested using the Firefox browser on an Apple iMac 21.5-in. computer. Participants performed the task seated ~57 cm away from the screen, using a wired Apple keyboard (they pressed the spacebar with both index fingers). Psytoolkit recorded data for the SART test, including reaction time and response accuracy for each stimulus. Based on these data, we calculated the percentage correctness of the reaction for all Go stimuli and separately for No-Go stimuli, as well as the average reaction time for Go stimuli. Additionally, we calculated a skill index by dividing the correct response to No-Go stimuli by the average reaction time to Go stimuli and multiplying the result by 1000. This index better reflects the efficiency of task performance (Jonker et al., 2013) and thus better represents the general ability to sustain attention, with higher scores indicating better test performance. Responses to Go stimuli with reaction times more than two standard deviations above or below the mean were excluded from all analyses.

Matrix Reasoning Item Bank test. The Matrix Reasoning Item Bank (MaRs-IB) test assesses individuals' inductive reasoning. This test is considered a good indicator of fluid intelligence correlated with reasoning, problem-solving, and learning abilities. Therefore, MaRs-IB is used to assess the efficiency of complex cognitive processes. It is also a good indicator of working memory capacity, which is the aspect of cognition most often affected by noise (Chierchia et al., 2019; Klichowski, 2024). It does not require a psychology degree for administration and is freely available for research (<https://osf.io/g96f4/>). Moreover, it can be simply implemented in computer-based experiments. The design of MaRs-IB is similar to Raven's Progressive Matrices (Raven, 2009). It consists of three-by-three matrices filled with abstract shapes, with the bottom right-hand side cell always empty. The participant's task is to analyze the relationships between the shapes in the cells (which could vary across color, size, position, and shape) and select the missing shape from a set of four possible answers (an example matrix is shown in Fig. 5a). (Chierchia et al., 2019) developed three counterbalanced test forms, each with 80 matrices differing only in the exact shape. Thanks to this, it is possible to implement selected test forms in procedures with a pre-test or baseline and a post-test or intervention without repeating the same trials. Additionally, items can be freely adapted and selected for tasks of different duration and difficulty levels. Therefore, following the approach of Jaeggi et al. (2014), who divided the 36 matrices from the advanced version of Raven's Progressive Matrices into pre-test/baseline and post-test/intervention, we prepared similar (modeled on the Raven's Progressive Matrices test) sets based on MaRs-IB matrices. We have already used them in our recent study, and the detailed description and the adjustment procedure are shown in our paper (Klichowski et al., 2023). Briefly, we selected the 18 most difficult matrices from two test forms, arranged by the number of transformations, and we verified the reliability of this test for baseline-intervention comparisons (selected matrices are available in the Open Science Framework database: <https://osf.io/kp48h>). In the current study, participants had 60 s to solve one matrix, with a clock symbol appearing on the screen after 50 s to indicate the remaining 10 s. If no response was given within 1 min, the software automatically moved to the next trial. At the same time, the participants were informed that the tasks should be completed as correctly and quickly as possible, so as soon as they knew the answer, they should provide it and continue to the following

matrix. Participants were required to complete two training trials before taking the test. They performed the task on an Apple iMac 21.5-in. computer, using a certified pad (Cedrus RB-730) to provide answers and SuperLab 6.1.2 software, which ran tests and recorded data for analysis. Based on these data, we calculated the accuracy as a percentage of correct responses to all trials, the total test completion time, and the average response time for only correctly answered matrices in both study phases. Since the matrices in parts one and two were analogously related pairs of the same difficulty level and type, we could compare them. So, for this last analysis, we matched them together and removed reaction time from any matrices that were only solved correctly in the first or second section of the study. Subsequently, we separately calculated the average reaction time for the remaining responses in baseline and intervention. Trials with response times under 250 ms were not included in the analyses.

Depression, Anxiety and Stress Scale. The Depression, Anxiety, and Stress Scale (DASS) is a self-report instrument developed to assess an individual's emotional states over a specific period of time (Lovibond and Lovibond, 1995). The DASS questionnaire is open-access, and its administration does not necessitate any particular qualifications or skills. It can be downloaded from the official website and copied without restriction. The scale is available in several versions: the original DASS-42 and two shorter versions, DASS-12, as well as DASS-21, which we used in this study. Owing to its ability to reduce response time while preserving high reliability, DASS-21 is recommended for research applications. It includes 21 items divided into three subscales, each corresponding to a negative emotional state: depression, anxiety, and tension/stress. Participants are asked to select a number from 0 to 3 that best represents the extent to which the statement applies to them over a specified period, which in our study was the duration of experimental noise exposure. Scores are calculated for each subscale separately and for the entire test, then multiplied by 2 to enable comparison with results from the DASS-42, with higher scores (range for a single scale 0–42 points and the entire test 0–126 points) indicating greater severity of negative emotional symptoms. While our primary objective was to examine stress, necessitating the use of the corresponding subscale, the authors of the tool note that this subscale pertains to a narrow understanding of stress. Given the close interrelation of the emotional states investigated in the questionnaire, a broader understanding of stress can be achieved by using all three subscales together. Consequently, we administered the entire DASS-21 questionnaire. However, we focused our analysis solely on the stress subscale results and the overall test outcome, omitting the results of the depression and anxiety scales themselves. We used the Polish translation of the DASS form, the factorial validity of which has been confirmed (Makara-Studzinska et al., 2022).

Noise annoyance. Annoyance caused by noise was evaluated using a modified 11-point scale from the International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN) (Fields et al., 2001). This scale is a standardized way of assessing noise annoyance and is part of the procedure for assessing noise annoyance contained in the ISO/TS 15666:2021 standard; therefore, it is widely used in noise research (Clark et al., 2021). Participants were instructed to select a number that most accurately represented the level of disturbance, irritation, or annoyance they experienced from the sounds while conducting the experimental task. The ICBEN scale extends from 0 to 10, where 0 signifies a situation where the sounds were not annoying, and 10 denotes extreme annoyance induced by the sounds. If a noise source is rated 7 points or higher, then this indicates a high level of annoyance with the noise source being evaluated.

Acoustic conditions. In the study conducted, our focus was on two distinct types of noise. The first type was road traffic noise, predominantly generated by vehicles in transit on the highway. The second type of stimulus was the noise produced by an operational wind turbine.

It should be noted that in practically all cases of the most used 2 MW wind turbines, the distance between the wind turbines and residential areas is no less than 500 m. For this reason, in the study setting, we assumed exactly this least favorable case of wind turbine location concerning areas people use. The sound pressure levels of wind turbine noise (as well as road traffic noise) were at 65.4 dB SPL. This sound pressure level corresponds to the actual average noise level of a wind turbine at 500 m. Thus, the study's conditions should be considered boundary conditions under which wind turbine noise may be generated soon. However, wind turbine and road traffic noise levels used in the study were not hazardous to health, as levels of 65 dB SPL correspond to the average level of speech during conversation.

To ensure a high degree of ecological validity, we utilized recordings of real-world noises and implemented them in an experimental setup using acoustically sophisticated procedures for playback. The subsequent sections provide a detailed account of the approach to obtaining these recordings and the procedure adopted for their experimental playback.

Road traffic noise. Road traffic noise, characterized by the sounds of cars and trucks moving on the highway during peak traffic, was recorded outdoor at a distance of 500 m from the A2 highway near Poznan, a large city in Poland. The recording was facilitated using a RODE NTSF1 ambisonic microphone, positioned at a height of 1.5 m relative to the ground level and connected to a SQuadriga II digital recording device. A Svantek SVAN 979 1. class sound level meter microphone was also deployed adjacent to the ambisonic microphone to measure the sound levels. From the recorded road traffic noise, a 15-min signal was selected. This signal was then duplicated three times to prepare a one-hour recording, which was subsequently presented to the participants during the experiment. Due to the continuous flow of vehicles on the highway, individual passes cannot be distinguished from the noise of road traffic. During the tests, the equivalent level of road traffic noise was set at $L^{RTN}_{eq} = 65.4$ dB SPL (56.8 dBA).

Wind turbine noise. The noise emitted by a single operational wind turbine was recorded outdoor at one of the wind farms located near Poznan. The recording was facilitated using a RODE NTSF1 ambisonic microphone, which was connected to a SQuadriga II digital recorder. A Svantek SVAN 979 first-class sound level meter microphone was used to control the sound levels. Both microphones were positioned at a height of 1.5 m relative to the ground level and were distanced 500 m from the wind turbine. The recordings were made for a typical 2 MW wind turbine commonly used in the country's wind farms, with a nacelle at 105 m and a rotor diameter of 90 m. During the recording session, the wind speed at the wind turbine hub height (105 m) was 8.2 m per second; at 10 m above the ground, it was ~4.5 m per second; and at the height of 1.5 m, the wind speed was less than 1 meter per second. The wind did not compromise the quality of the sound recordings. A seven-minute segment of the wind turbine noise signal was selected from the collected recordings and looped to generate one-hour sound material for the experiments. The wind turbine noise was characterized by periodic fluctuations in the sound level, known as amplitude modulation. The average modulation rate was 0.8–1 Hz, while the modulation depth, on average, stood around 6.9 dB. During the experiment, the equivalent noise level of the wind turbine was $L^{WTN}_{eq} = 65.4$ dB SPL (38.5 dBA). This level was equal to the

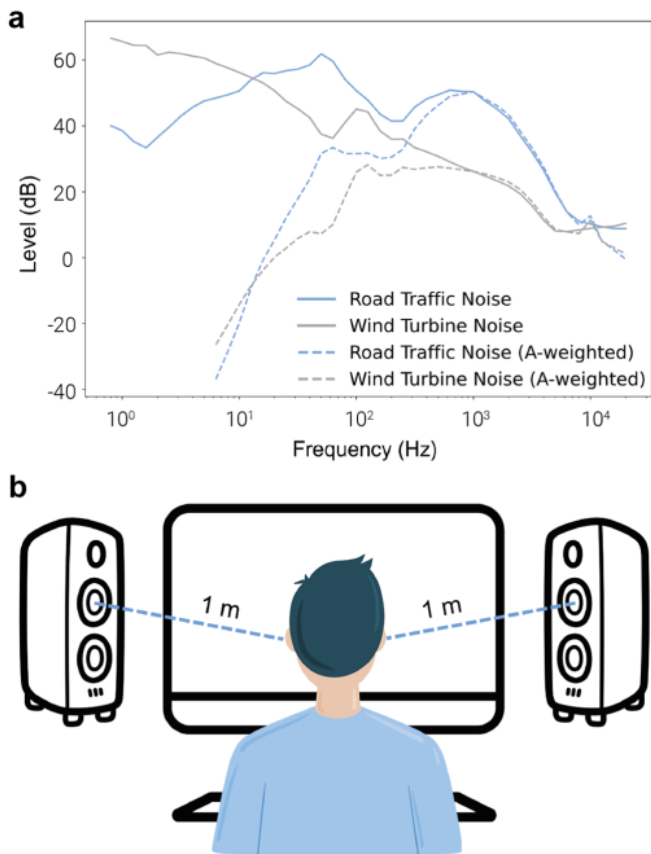


Fig. 2 Noise playback. **a** 1/3 octave frequency spectra of test signals used in the study. Solid lines show spectra without frequency correction and dashed lines with A-weighting. The A-weighted curve is derived from the 40-phon equal-loudness contour, which reflects the perception of loudness across the entire range of human hearing (note that A-weighting is used for environmental or workplace noise measurements, and based on A-weighted noise levels, the risk of hearing loss is evaluated). The frequency range for the uncorrected spectrum is 0.8 Hz–20 kHz, and for the A-weighted spectrum, 20 Hz–20 kHz. **b** Arrangement of sound sources in an acoustically isolated room. The speakers were symmetrically positioned on the left and right sides of the participant, each maintaining a distance of 1 meter. They were aligned to match the height of the listener's head. A subwoofer was placed on the floor.

equivalent level of road traffic noise. Both recordings (road traffic and wind turbine noise) which have been developed are available in the Open Science Framework database: <https://osf.io/wpk4c>.

Road traffic noise and wind turbine noise playback. Participants were presented with the original wind turbine/road traffic noise sounds as they were recorded in the environment, also keeping the sound pressure level of the sounds presented. The sounds were not filtered. The road traffic and wind turbine noise recordings were played back in an acoustically isolated room. The playback was facilitated using an Apple iMac 21.5-in. computer, which was connected to two Yamaha HS5 speakers and a Velodyne EQ-Max 15 subwoofer. Both the road traffic and wind turbine noise had equivalent levels of 65.4 dB SPL. The 1/3 octave spectra of the road traffic and wind turbine noise are depicted in Fig. 2a. The speakers were symmetrically positioned on the left and right sides relative to the participant, maintaining a distance of 1 m, and were aligned with the height of the listener's head. Figure 2b shows an arrangement of the locations of the sound sources. The sounds were calibrated using a Class 1 SVANTEK SVAN 979 sound level meter in the test room. The calibration

microphone, connected to the sound level meter, was located where the test subject's head was during listening. Equivalent sound levels were measured during calibration. The gain was selected to obtain equivalent sound levels of 65.4 dB SPL for both wind turbine and road traffic noise. This test set replicates the situation where a person is exposed to a wind turbine or road traffic noise outside their property or inside a room with a window open (i.e., without the noise reduction provided by a closed window).

Data analysis. Initially, we employed a repeated measures ANOVA for each dependent variable with time (baseline/first section of the study, intervention/second section) as the repeated measure factors and group (wind turbine noise, road traffic noise, silence) as between-subject factors. The Greenhouse-Geisser correction was applied where appropriate. We utilized partial eta squared (η^2p) to gauge the effect size. Subsequently, we computed the changes/delta (Δ) between intervention and baseline measurements by subtracting the baseline value from the second measurement result. Then, using a one-way ANOVA with group as a grouping variable, we compared the differences in mean Δ between groups, as well as in the assessment of stress and annoyance levels. All necessary post hoc tests for pairwise comparisons were conducted with an additional Tukey's correction. Finally, we performed a Pearson's correlation analysis between the assessed levels of stress and annoyance and the values obtained from the scales of ambiguity tolerance, rumination, and reflection. All statistical analyses were executed using *jamovi* (Version 2.3.18.0) for Mac (Lenth, 2020; R Core Team, 2021; Singmann, 2018; The jamovi project, 2022), and the *jamovi* file with anonymized data is available in the Open Science Framework database: <https://osf.io/wpk4c>. Prior to any analyses, a combination of visual methods using Q-Q (quantile-quantile) plots and assessment using skewness and kurtosis was employed to examine indicators related to the shape of the distribution (Ghasemi and Zahediasl, 2012; Kim, 2013). The level of significance adopted was $\alpha = 0.05$.

Results

Alterations in neural dynamics. In our pilot study, we found no significant main effect of time on neural dynamics during the resting state (Fig. 3a, b), irrespective of whether the eyes were open ($F_{1,42} = 0.270$, $p = 0.606$, $\eta^2p = 0.006$) or closed ($F_{1,42} = 2.806$, $p = 0.101$, $\eta^2p = 0.063$). A similar observation was made for the main effect of group, which remained non-significant in both phases ($F_{2,42} = 0.636$, $p = 0.534$, $\eta^2p = 0.029$ and $F_{2,42} = 0.927$, $p = 0.404$, $\eta^2p = 0.042$, respectively). However, an effect of time was noted for the cognitive state ($F_{1,42} = 5.168$, $p = 0.028$, $\eta^2p = 0.110$), as indicated by a deterioration in TBR by 0.04 (from 1.15 to 1.19, $t = 2.273$, $df = 42$, Tukey's $p = 0.028$). Despite this observation, the main effect of group did not reach significance ($F_{2,42} = 1.451$, $p = 0.246$, $\eta^2p = 0.065$). Moreover, the time \times group interaction was also non-significant ($F_{2,42} = 1.049$, $p = 0.359$, $\eta^2p = 0.048$; Fig. 3c). Consequently, the change in TBR over the entire measurement duration merely showed a trend ($F_{1,42} = 3.296$, $p = 0.077$, $\eta^2p = 0.073$) toward worsening (by 0.03, from 1.15) without reaching statistical significance ($t = 1.815$, $df = 42$, Tukey's $p = 0.077$). Furthermore, neither the effect of group ($F_{2,42} = 1.096$, $p = 0.343$, $\eta^2p = 0.050$) nor the time \times group interaction ($F_{2,42} = 0.562$, $p = 0.574$, $\eta^2p = 0.026$) were significant for overall TBR (Fig. 3d).

Ultimately, the group variable did not manifest as a distinguishing factor for the average Δ derived from the EEG recordings. No significant differences were detected in TBR during various states when comparing the groups. This includes

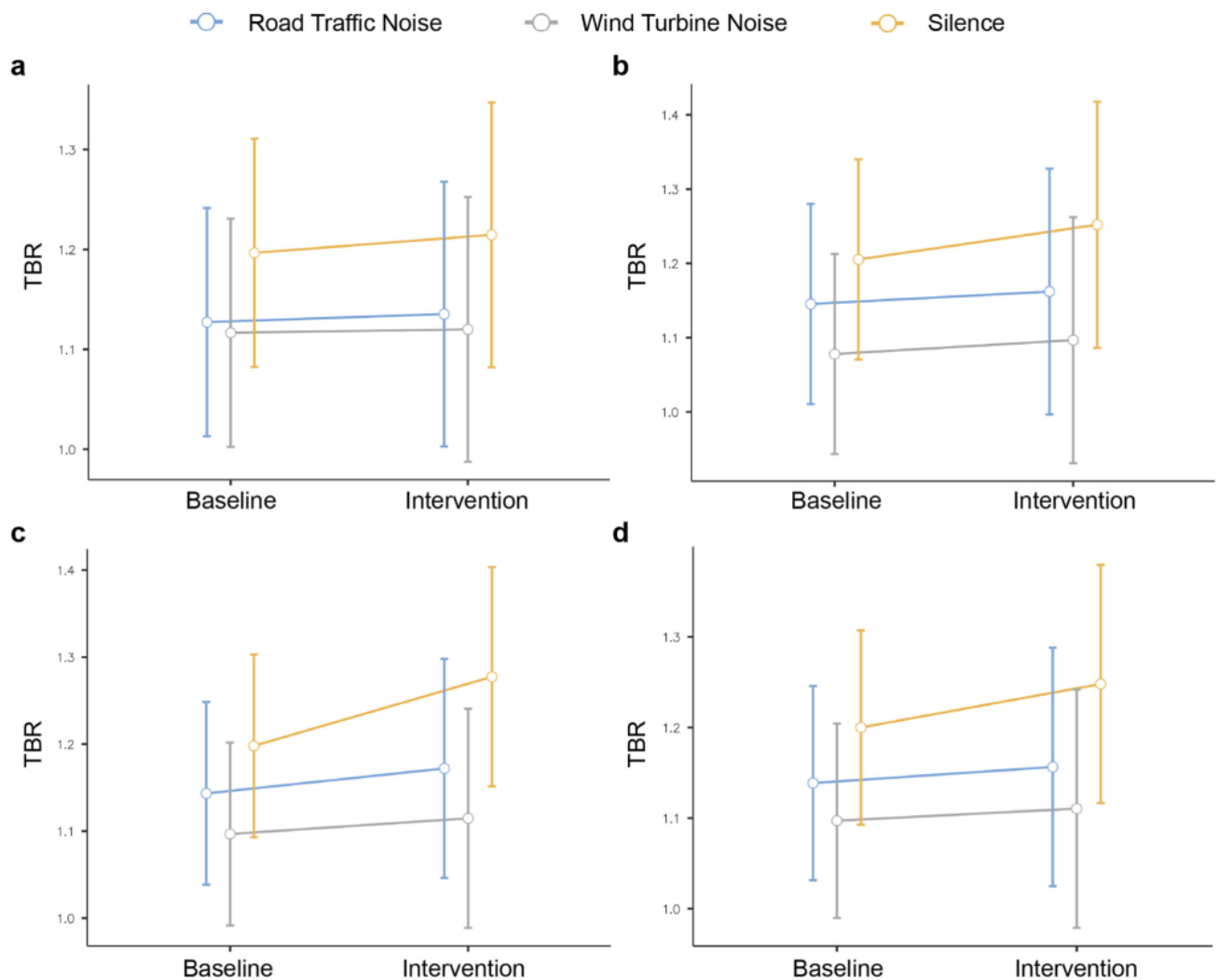


Fig. 3 Effects of wind turbine noise on alterations in neural dynamics compared to two other acoustic conditions. **a** The estimated marginal means plot shows no change in the Theta/Beta Ratio (TBR) measured during the resting state with open eyes across all groups ($n = 45$). **b** The estimated marginal means plot shows no change in the TBR measured during the resting state with closed eyes across all groups ($n = 45$). **c** The estimated marginal means plot shows a significant decrease in the TBR measured during the cognitive state across all groups ($n = 45$). **d** The estimated marginal means plot shows a decreasing trend in the TBR measured throughout the entire duration of the measurement across all groups ($n = 45$). Error bars represent standard errors of the means.

the resting state with the participant's eyes open ($F_{2,42} = 0.053$, $p = 0.949$), the resting state with the participant's eyes closed ($F_{2,42} = 0.352$, $p = 0.705$), the cognitive state ($F_{2,42} = 1.049$, $p = 0.359$), and throughout the entire duration of the measurement ($F_{2,42} = 0.562$, $p = 0.574$). In other words, the observed deterioration in neural dynamics in the cognitive state and the negative trend in global TBR were not attributable to exposure to wind turbine (or control) noise. Instead, these effects were likely due to cognitive fatigue resulting from participation in a relatively long experiment or other factors.

Effects on cognitive behaviors. Although we observed a main effect of time in some instances involving improved cognitive functioning as a specific manifestation of gaining skills and learning, we did not detect a group effect anywhere. Moreover, none of the interactions of time and group were significant.

For sustained attention, an improvement occurred in the accuracy of responses to Go stimuli ($F_{1,42} = 5.377$, $p = 0.025$, $\eta^2 p = 0.113$) as such that the participants improved their score by an average 0.57% (from 98.41% to 98.98%, $t = 2.319$, $df = 42$, Tukey's $p = 0.025$). However, the group effect was not significant

here ($F_{2,42} = 1.481$, $p = 0.239$, $\eta^2 p = 0.066$). Also, the time \times group interaction was not significant ($F_{2,42} = 0.267$, $p = 0.767$, $\eta^2 p = 0.013$; Fig. 4a). The mean reaction time to Go stimuli (Fig. 4b) did not improve in terms of speed ($F_{1,42} = 0.171$, $p = 0.682$, $\eta^2 p = 0.004$), and this was a finding that did not differ between groups ($F_{2,42} = 0.681$, $p = 0.512$, $\eta^2 p = 0.031$). The same was observed for the accuracy of responses to No-Go stimuli (Fig. 4c). There was neither a time effect ($F_{1,42} = 0.537$, $p = 0.468$, $\eta^2 p = 0.013$) nor a group effect ($F_{2,42} = 0.712$, $p = 0.193$, $\eta^2 p = 0.075$). Ultimately, the analysis for the skill index (Fig. 4d) did not show a global change (improvement or deterioration) in sustained attention ($F_{1,42} = 0.146$, $p = 0.705$, $\eta^2 p = 0.003$) and no differences in this respect between groups ($F_{2,42} = 1.480$, $p = 0.239$, $\eta^2 p = 0.066$).

Concerning inductive reasoning, improvement occurred in all of the three contexts analyzed (Fig. 5b–d). Regarding the accuracy of responses, the main effect of time was significant ($F_{1,42} = 9.311$, $p = 0.004$, $\eta^2 p = 0.181$), leading to an average improvement of 7.65% in participants' performance during the second part of the test (from 60.74% to 68.39%, $t = 3.051$, $df = 42$, Tukey's $p = 0.004$). This effect was also apparent in the execution speed

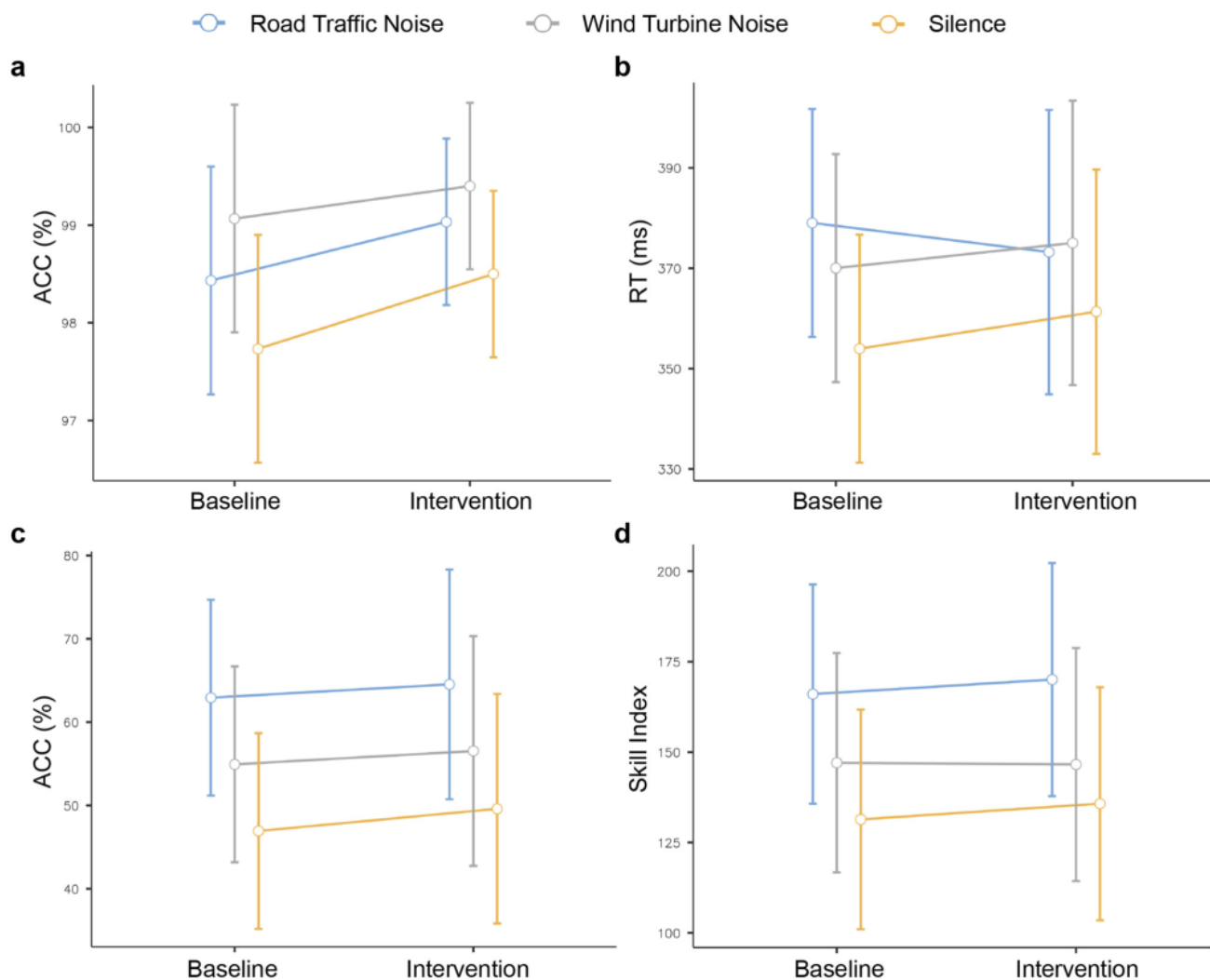


Fig. 4 Effects of wind turbine noise on sustained attention compared to two other acoustic conditions. **a** The estimated marginal means plot shows a significant improvement in the accuracy of responses to Go stimuli across all groups ($n = 45$). **b** The estimated marginal means plot shows no change in the average reaction time to Go stimuli across all groups ($n = 45$). **c** The estimated marginal means plot shows no change in the ACC of responses to No-Go stimuli across all groups ($n = 45$). **d** The estimated marginal means plot shows no change in the overall ability to maintain attention across all groups ($n = 45$). ACC is an abbreviation for accuracy, while RT is for reaction time. Error bars represent standard errors of the means.

of the test section ($F_{1,42} = 16.293$, $p = 0.00023$, $\eta^2 p = 0.280$), with participants completing the second part, on average, 1 min and 42 s faster (from the initial 10 min and 37 s to 8 min and 55 s, $t = 4.036$, $df = 42$, Tukey's $p = 0.00023$). Moreover, the influence of time extended to the average response time ($F_{1,42} = 37.926$, $p < 0.00001$, $\eta^2 p = 0.475$), which was reduced by an average of 6 s in the second part (from 35 s to 29 s, $t = 6.158$, $df = 42$, Tukey's $p < 0.00001$). Despite these observations, no group effect was detected (all $F_{2,42} < 2.304$, all $p > 0.112$, all $\eta^2 p < 0.099$), and the interaction between time and group remained consistently non-significant (all $F_{2,42} < 1.179$, all $p > 0.318$, all $\eta^2 p < 0.053$).

Moreover, the group variable did not emerge as a differentiating factor for the mean Δ calculated from the behavioral measurements. Consequently, no differences were observed between groups in terms of the change in response accuracy to Go stimuli ($F_{2,42} = 0.267$, $p = 0.767$), the average reaction time to Go stimuli ($F_{2,42} = 0.589$, $p = 0.560$), the response accuracy to No-Go stimuli ($F_{2,42} = 0.018$, $p = 0.982$), and the sustained attention skill index ($F_{2,42} = 0.051$, $p = 0.950$). Similarly, no disparities were found between groups when it comes to change in the response accuracy during inductive reasoning ($F_{2,42} = 0.395$, $p = 0.676$) and the total test completion time

($F_{2,42} = 0.305$, $p = 0.739$), including the average response time ($F_{2,42} = 1.179$, $p = 0.318$).

Assessment of stress and annoyance levels, and their psychological underpinnings. Participants evaluated the stress induced by the acoustic conditions of the experiment as extremely low, both in terms of the stress subscale (mean=9.27 points, $SD = 7.06$ points) and the overall emotional score (mean=19.47 points, $SD = 14.63$ points). In both instances (Fig. 6a, b), no significant differences were detected between the groups ($F_{1,28} = 0.023$, $p = 0.880$ and $F_{1,28} = 0.002$, $p = 0.961$, respectively). A similar pattern was observed in the context of noise annoyance. Participants rated it as minimal (mean=2.00 points, $SD = 2.03$ points). Moreover, as Fig. 6c and Table 1 show, although wind turbine noise was reported as marginally more annoying than road traffic noise (the mean difference=0.80), this disparity was not significant ($F_{1,28} = 1.167$, $p = 0.289$).

Furthermore, the distributions of these three variables in response to wind turbine noise did not correlate with the values obtained from the scales of ambiguity tolerance (for the stress subscale $r = -0.423$ and $p = 0.116$, for the overall emotional score $r = -0.243$ and $p = 0.382$, for the noise annoyance

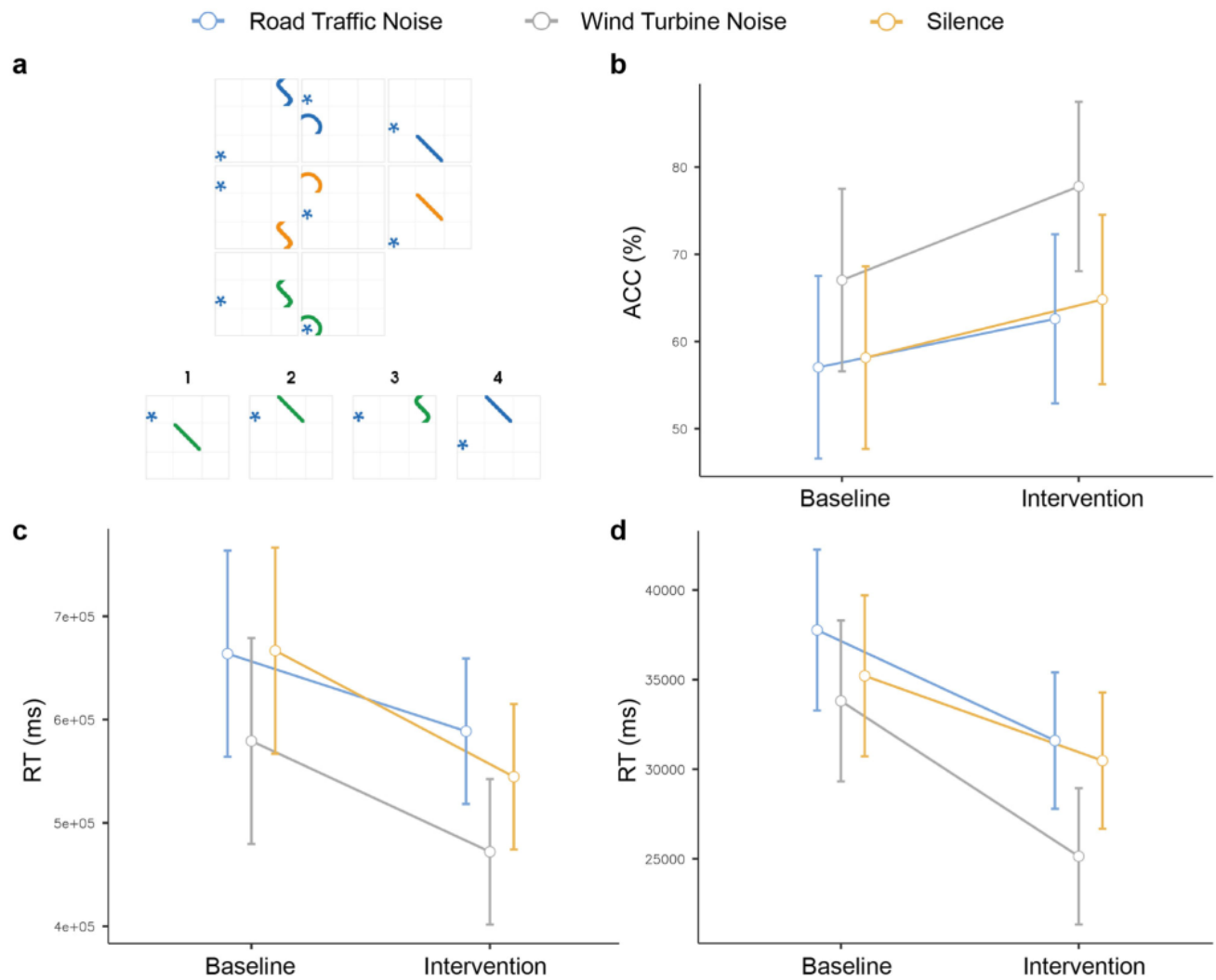


Fig. 5 Effects of wind turbine noise on inductive reasoning compared to two other acoustic conditions. a An example matrix of Matrix Reasoning Item Bank Test (the participant’s task is to select the missing shape from a set of four possible options; the correct answer, in this case, is “2”). **b** The estimated marginal means plot shows a significant improvement in the accuracy of responses across all groups ($n = 45$). **c** The estimated marginal means plot shows a significant enhancement in the execution speed of the test part across all groups ($n = 45$). **d** The estimated marginal means plot showing a significant reduction in the average response time across all groups ($n = 45$). ACC is an abbreviation for accuracy, while RT is for reaction time. Error bars represent standard errors of the means.

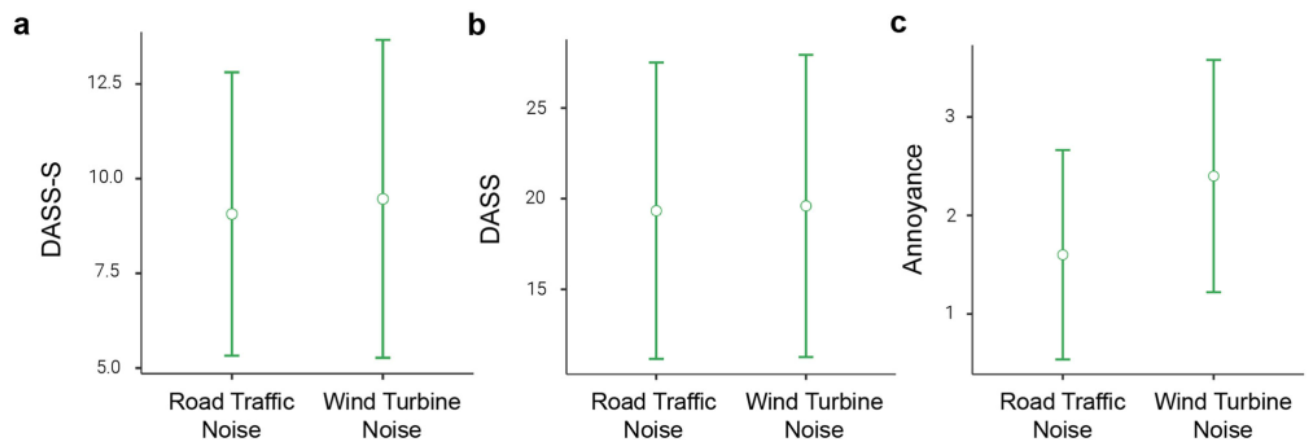


Fig. 6 Assessment of noise-induced stress and annoyance. a A one-way ANOVA shows no significant differences between groups concerning noise-induced stress ($n = 30$). **b** A one-way ANOVA shows no significant differences between groups concerning noise-induced overall emotional state ($n = 30$). **c** A one-way ANOVA shows no significant differences between groups concerning noise annoyance assessment ($n = 30$). DASS is an abbreviation for Depression, Anxiety, and Stress Scale, while DASS-S for its stress subscale. Error bars represent standard errors of the means.

Table 1 Assessment of noise-induced stress and annoyance, and the results of pairwise comparisons.

Scale	Group				Mean difference	t	df	Tukey's p
	Road Traffic Noise		Wind Turbine Noise					
	Mean	SD	Mean	SD				
DASS	19.33	14.75	19.60	15.03	0.27	0.049	28	0.961
DASS-S	9.07	6.76	9.47	7.58	0.40	0.153	28	0.880
Annoyance	1.60	1.92	2.40	2.13	0.80	1.080	28	0.289

DASS Depression, Anxiety, and Stress Scale, DASS-S stress subscale of Depression, Anxiety, and Stress Scale.

$r = -0.397$ and $p = 0.142$; Fig. 7a), rumination ($r = 0.252$, $p = 0.364$, $r = 0.317$, $p = 0.249$, and $r = -0.358$, $p = 0.191$, respectively; Fig. 7b), and reflection ($r = -0.265$, $p = 0.340$, $r = -0.061$, $p = 0.829$, and $r = -0.207$, $p = 0.460$; Fig. 7c). Therefore, even a low tolerance for ambiguity or tendencies towards neurotic self-focused thoughts, as well as a diminished capacity for epistemic self-reflection, did not result in maladaptive perceptions of wind turbine noise, which could have an indirect impact on cognitive functioning.

Discussion

The limitations of previous research approaches leave open the question of whether wind turbine noise directly affects human functioning or if its possible negative impact results from non-acoustic variables, such as socio-culturally constructed beliefs (Michaud et al., 2016; Michaud et al., 2025; Ramalho et al., 2025; Tsionas et al., 2025; Woodland et al., 2024). Considering the social importance of this unresolved issue (Brouwer et al., 2025; le Maitre et al., 2024; Martinez and Iglesias, 2024), we described in this work how cognitive neuroscience techniques and tenets can be applied for a more objective and comprehensive assessment of the impact of wind turbine noise on various mental functions. Apart from outlining the assumptions of such a unique approach, we attempted to apply it in a pilot study. Overall, in line with the proposed approach, we conducted the study under highly controlled conditions (i.e., in a laboratory) while ensuring high ecological validity. Additionally, the primary dependent variable was measured not only at the behavioral level (using recognized psychological tests) but also at the neuronal level (via EEG). The dependent variable itself was cognitive processes associated with everyday mental tasks. The study was also blind regarding the independent variable (acoustic conditions). This was accompanied by controlling psychological and auditory factors, as well as measuring annoyance and stress levels.

Our results did not show a negative impact of short-term exposure to wind turbine noise on cognitive functions when tested at the neuronal and behavioral levels. Wind turbine noise neither lowered cognitive efficiency nor interfered with learning mechanisms (Figs. 4 and 5), nor changed the natural dynamics of brain waves for a given state (cognitive or rest, Fig. 3). Furthermore, this noise was not perceived as significantly more annoying or stressful than road traffic noise (Fig. 6 and Table 1), even when individuals exhibited maladaptive traits, such as low ambiguity tolerance (Fig. 7a), decreased reflection/epistemic self-focused thoughts (Fig. 7c), and high rumination/neurotic self-focused thoughts (Fig. 7b). Therefore, our initial hypothesis that exposure to wind turbine noise would detrimentally affect cognitive functioning was not validated. The other two hypotheses, namely that wind turbine noise would be perceived as more bothersome and stressful than road traffic noise and that psychological traits moderate its perception, were also not supported.

However, these null results do not negate the potential adverse influence of such noise on human brain processes or the fact that

psychological diversity plays no role here. Instead, they indicate that under the conditions proposed in our approach, which are blind to the nature of the acoustic variable and thus detached from the social meanings attributed to wind turbine noise, such effects do not occur. It should be noted that, based on the IC BEN scale results, 14 out of 15 participants exposed to wind turbine noise rated their annoyance as either 0 ($n = 4$), 1 ($n = 3$), 3 ($n = 2$), or 4 ($n = 5$), indicating minimal disturbance, even in the presence of maladaptive or neurotic psychological traits. Only one individual rated their annoyance as high (at 7), despite a low score for rumination, but with low ambiguity tolerance and reflectivity. This implies that 93% of participants did not find wind turbine noise intrusive (Clark et al., 2021; Fields et al., 2001). As per previous studies, noise would negatively impact the neural dynamics of complex cognitive processes, sustained attention, and inductive reasoning only in case of high annoyance (Astuti et al., 2023; Muller et al., 2023; Pieper et al., 2021). The low annoyance (as well as stress) ratings observed in our exploration would be attributed to the fact that participants were unaware of the nature of the sounds they were exposed to (the procedure was blind, and no volunteers identified experimental sounds as wind turbine noise). Thus, they did not evaluate the noise from the perspective of socially constructed assertions or as a consequence of wind turbine syndrome mechanisms (Clark et al., 2020; Pierpont, 2009; Schaffer et al., 2016; Smith et al., 2020). As a result, they did not experience the nocebo effect (Crichton and Petrie, 2015), and we did not observe any impact of wind turbine noise on their cognitive functioning. This suggests that the sound pressure level of the wind turbine noise used in our study, i.e., 65 dB SPL, which mirrors real-world conditions and has no effect on the onset of hearing loss (Natarajan et al., 2023), does not directly threaten also human cognitive functioning. The real threat likely stems from socially constructed beliefs (Davy et al., 2020; Hanning and Evans, 2012; Hansen and Hansen, 2020; Lundheim et al., 2022; Takeuchi, 2023).

This interpretation is compatible with previous findings showing social contexts, such as socialization and misinformation, as a moderator of the interlinkage between wind turbine noise and human functioning (Miedema and Vos, 2003; Obuseh et al., 2025; Pohl et al., 2018; Ramalho et al., 2025; Schaffer et al., 2016). More broadly, it is consistent with approaches emphasizing that concerning wind turbines, the source of annoyance is rooted in non-acoustic variables (Ata Teneler and Hassoy, 2024; McCunney et al., 2014; Schmidt and Klokker, 2014). Nevertheless, further research is needed to confirm the proposed interpretation. For instance, our experiment could be replicated with a placebo-controlled condition, where beliefs are induced. Participants would be informed in one group that they would perform tasks amidst wind turbine noise. In another group, individuals would receive the same instruction but would not be exposed to wind turbine noise. Instead, they would listen to a non-annoying control sound (Klichowski et al., 2023). The results, correlated with psychological scales, could reveal the

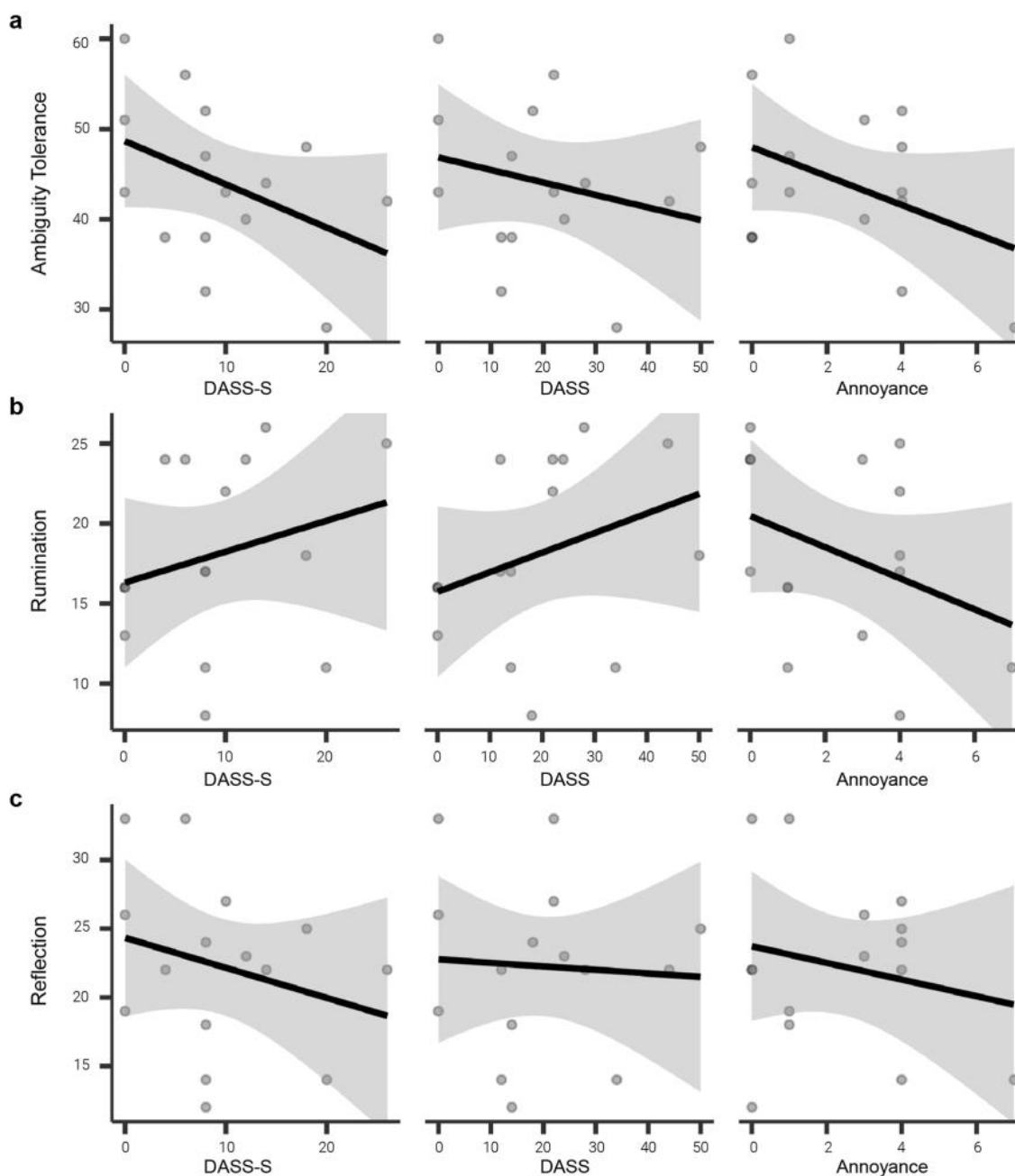


Fig. 7 Psychological underpinnings of wind-turbine-noise-induced stress and annoyance. **a** Pearson's correlation analyses show no relation between the level of ambiguity tolerance and wind-turbine-noise-induced stress and annoyance ($n = 15$). **b** Pearson's correlation analyses show no relation between the level of rumination and wind-turbine-noise-induced stress and annoyance ($n = 15$). **c** Pearson's correlation analyses show no relation between the level of reflection and wind-turbine-noise-induced stress and annoyance ($n = 15$). DASS is an abbreviation for Depression, Anxiety, and Stress Scale, while DASS-S for its stress subscale. The dark line represents regression of two variables, and shaded area shows standard error of the regression line.

personality profile of individuals susceptible to wind turbine syndrome; however, it would be necessary to ensure a more diverse and extensive sample than in our experiment (Clark et al., 2020; Crichton and Petrie, 2015; Schaffer et al., 2016; Smith et al., 2020; Taylor et al., 2013; Woodland et al., 2024).

Future research should also address the problem of the duration of noise exposure (Alamir et al., 2019; Merino-Martinez et al., 2021). We are uncertain whether we would observe no adverse effects if participants were exposed to noise longer, for example, for several hours. Yet, it is essential to emphasize that our goal was to investigate the direct impact of wind turbine noise on the dynamics of mechanisms controlling cognitive processes. Therefore, short-term exposure to wind turbine noise was

appropriate here. Moreover, it was ecologically valid, as people sometimes find themselves where they need to perform short cognitive tasks near wind farms (not while living next to them). However, the results of our study cannot be extrapolated to more frequent situations where exposure to wind turbine noise is much longer (such as for individuals who work or live close to wind farms). Thus, it remains an open question whether prolonged exposure would lead to annoyance and, as a consequence, impair cognitive functions; alternatively, whether or not some habituation may occur in a long-exposure situation and minimize the annoyance (Mutschler et al., 2010). New studies are needed to answer these questions. Duration of exposure should be manipulated in them. Such experiments may take into account,

for example, conditions with short exposure (as in our experiment), more prolonged exposure (e.g., 3–5 h), and extremely long exposure (e.g., 24 h). To objectively evaluate the impact of different exposure durations to wind turbine noise on various cognitive functions, a between-group study design should be chosen, and the measurement of cognitive process efficiency should be run at the end of each exposure type.

Some technical and operational contexts should also be considered in further experiments. The wind turbine noise used in the study was recorded during operation at a hub wind speed above 8 m per second. At wind speeds of 8 m per second and above, the turbine generates maximum noise levels, and the sound power level, which uniquely characterizes any sound/noise source, including wind turbines, ranges from 104 to 108 dBA (Hoen et al., 2023). Since the sound power level of any wind turbine reaches its maximum value at a wind speed of 8 m per second, measurements are made at this wind speed (Keith et al., 2016). Additionally, the 2 MW wind turbine is now widely used in wind farms, including in Poland (Talarek et al., 2022), and (Hoen et al., 2023) show that the difference in sound power level between a 2 MW turbine and a larger turbine (up to 5 MW) is at most 4 dB. Thus, it can be assumed that the wind turbine noise recording used in our study represents the situation when the turbine is 500 m away from the observer, reflecting maximum noise levels for such a distance (importantly, without the noise reduction provided by the building facade, Hu et al., 2022). Future studies should use recordings from different wind turbine models or those prepared under different operational conditions, such as starting multiple turbines or varying weather conditions, as additional conditions.

Conclusions

In this work, we proposed a cognitive neuroscience approach to experimentally and multifactorially explore the impact of wind turbine noise on various mental functions. The uniqueness of this approach lies in adopting multiple assumptions inspired by cognitive neuroscience methodologies while simultaneously adhering to psychoacoustic research standards previously used in wind energy development studies. In summary, this approach involves conducting highly controlled laboratory experiments using recognized tests and techniques to measure cognitive components associated with everyday mental tasks at both the behavioral and neuronal levels. Additionally, it requires constructing high ecological validity conditions, for example, by using actual recordings of wind turbine noise at volumes characteristic of natural situations as an experimental factor. The approach assumes that participants are blind to the nature and manipulation of acoustic variables and that all participants exhibit standard auditory perception across an extensive frequency spectrum. Furthermore, it includes the control of psychological variables (using reliable and standardized psychological tests) that could render wind turbine noise more annoying and stressful.

Using this approach, we conducted a pilot study, the results of which indicate that when participants are exposed to wind turbine noise with a sound pressure level corresponding to real-world situations (i.e., 65 dB SPL) without knowing that it is the sound of an operating wind farm, the noise does not adversely affect brain functions and is not perceived maladaptively, even when individuals have tendencies towards maladaptive thoughts. These results cannot be generalized; however, they support the concept that the interlinkage between exposure to wind turbine noise and human cognitive functioning is not a cause-and-effect relationship but is mediated by socially constructed beliefs about wind farms. Further development of this promising approach could advance research on the wind industry's impact on human

cognition. Undoubtedly, subsequent studies must consider additional elements such as placebo-controlled conditions, manipulation of exposure duration, recordings from different wind turbine models prepared under various operational conditions, and diverse and extensive samples. The results of the studies using our approach extended with the above-mentioned additional procedure criteria could limit misinformation's role in decision-making or opinion-forming and increase the share of evidence in discussions among stakeholder groups, such as residents, policymakers, and energy developers. Additionally, they could help formulate reliable recommendations regarding wind energy policy.

Data availability

The anonymized data generated in the current study is available in the Open Science Framework database: <https://osf.io/wpk4c>.

Received: 1 July 2024; Accepted: 21 February 2025;

Published online: 03 March 2025

References

- Ageborg Morsing J, Smith MG, Ogren M, Thorsson P, Pedersen E, Forssen J, Persson Wayne K (2018) Wind turbine noise and sleep: Pilot studies on the influence of noise characteristics. *Int J Environ Res Public Health* 15(11):2573. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112573>
- Alamir MA, Hansen KL, Zajamsek B, Catchside P (2019) Subjective responses to wind farm noise: a review of laboratory listening test methods. *Renew Sustain Energy Rev* 114:109317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109317>
- Alkmim M, Cardenuto J, Tengan E, Dietzen T, Van Waterschoot T, Cuenca J, De Ryck L, Desmet W (2022) Drone noise directivity and psychoacoustic evaluation using a hemispherical microphone array. *J Acoust Soc Am* 152(5):2735–2745. <https://doi.org/10.1121/10.0014957>
- Angelidis A, van der Does W, Schakel L, Putman P (2016) Frontal EEG theta/beta ratio as an electrophysiological marker for attentional control and its test-retest reliability. *Biol Psychol* 121:49–52. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.09.008>
- Astuti RD, Suhardi B, Laksono PW, Susanto N, Muguro J (2023) Literature review: Impact of noise on cognitive performance using electroencephalography. *Appl Mech Mater* 913:131–147. <https://doi.org/10.4028/p-052746>
- Ata Teneler A, Hassoy H (2024) Evaluation of risk perception related with environmental noise among residents living in different vicinities of wind turbines. *Int J Environ Health Res* 34(3):1788–1799. <https://doi.org/10.1080/09603123.2023.2245344>
- Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, Stansfeld S (2014) Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet* 383(9925):1325–1332. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X)
- Boone W, Piccinini G (2016) The cognitive neuroscience revolution. *Synthese* 193:1509–1534. <https://doi.org/10.1007/s11229-015-0783-4>
- Brouwer B, van Bergem R, Renes S, Kamp LM, Hoppe T (2025) Does local ownership matter? A comparative analysis of fourteen wind energy projects in the Netherlands. *Energy Res Soc Sci* 120:103891. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103891>
- Chierchia G, Fuhrmann D, Knoll LJ, Pi-Sunyer BP, Sakhardande AL, Blakemore SJ (2019) The matrix reasoning item bank (MaRs-IB): Novel, open-access abstract reasoning items for adolescents and adults. *R Soc Open Sci* 6(10):190232. <https://doi.org/10.1098/rsos.190232>
- Clark C, Crumpler C, Notley H (2020) Evidence for environmental noise effects on health for the United Kingdom policy context: a systematic review of the effects of environmental noise on mental health, wellbeing, quality of life, cancer, dementia, birth, reproductive outcomes, and cognition. *Int J Environ Res Public Health* 17(2):393. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020393>
- Clark C, Gjestland T, Lavia L, Notley H, Michaud D, Morinaga M (2021) Assessing community noise annoyance: A review of two decades of the international technical specification ISO/TS 15666:2003. *J Acoust Soc Am* 150(5):3362–3373. <https://doi.org/10.1121/10.0006967>
- Clark C, Paunovic K (2018) WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and cognition. *Int J Environ Res Public Health* 15(2):285. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020285>
- Clarke AR, Barry RJ, Karamacoska D, Johnstone SJ (2019) The EEG theta/beta ratio: a marker of arousal or cognitive processing capacity? *Appl Psychophys Biol* 44:123–129. <https://doi.org/10.1007/s10484-018-09428-6>
- Cohen J (1988) *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Lawrence Erlbaum

- Cowley BU (2018) Studying the integrated functional cognitive basis of sustained attention with a Primed Subjective-Illusory-Contour Attention Task. *Sci Rep* 8:13514. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31876-7>
- Crichton F, Petrie KJ (2015) Health complaints and wind turbines: the efficacy of explaining the placebo response to reduce symptom reporting. *Environ Res* 140:449–455. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.04.016>
- Czajeczny D (2016) Skala Tolerancji Wieloznaczości Edwarda F. McQuarriego i Davida Glenna Micka: Polska adaptacja. *Testy Psychologiczne w Praktyce i Badaniach* 2(1):1–18. <https://doi.org/10.14746/tpb.2016.1.1>
- Davy JL, Burgemeister K, Hillman D, Carlile S (2020) A Review of the potential impacts of wind turbine noise in the Australian context. *Acoust Aust* 48(2):181–197. <https://doi.org/10.1007/s40857-020-00192-4>
- Fields JM, de Jong RG, Gjestland T, Flindell IH, Job RS, Kurra S, Lercher P, Vallet M, Yano T, Research team at Ruth University, Guski R, Felscher-Suhr U, Schumer R (2001) Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation. *J Sound Vib* 242(4):641–679. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3384>
- Ghasemi A, Zahediasl S (2012) Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *Int J Endocrinol Metab* 10(2):486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Hafke-Dys HZ, Preis A, Kaczmarek T, Biniakowski A, Kleka P (2016) Noise annoyance caused by amplitude modulated sounds resembling the main characteristics of temporal wind turbine noise. *Arch Acoust* 41(2):221–232. <https://doi.org/10.1515/aoa-2016-0022>
- Hanning CD, Evans A (2012) Wind turbine noise. *BMJ* 344:e1527. <https://doi.org/10.1136/bmj.e1527>
- Hansen C, Hansen K (2020) Recent advances in wind turbine noise research. *Acoust* 2(1):171–206. <https://doi.org/10.3390/acoustics2010013>
- Hayes BK, Heit E (2017) Inductive reasoning 2.0. *WIREs Cogn Sci* 9:e1459. <https://doi.org/10.1002/wcs.1459>
- Hoehn B, Darlow R, Haac R, Rand J, Kaliski K (2023) Effects of land-based wind turbine up-sizing on community sound levels and power and energy density. *Appl Energy* 338:120856. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120856>
- Hu Z, Zayed T, Cheng L (2022) A critical review of acoustic modeling and research on building façade. *Build Acoust* 29(1):107–134. <https://doi.org/10.1177/1351010X2110227>
- Hubner G, Pohl J, Hoehn B, Firestone J, Rand J, Elliott D, Haac R (2019) Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: a comparison of U.S. and European samples. *Environ Int* 132:105090. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105090>
- Illardi SS, Feldman D (2001) The cognitive neuroscience paradigm: a unifying metatheoretical framework for the science and practice of clinical psychology. *J Clin Psychol* 57(9):1067–1088. <https://doi.org/10.1002/jclp.1124>
- Ioannidou C, Santurette S, Jeong CH (2016) Effect of modulation depth, frequency, and intermittence on wind turbine noise annoyance. *J Acoust Soc Am* 139(3):1241–1251. <https://doi.org/10.1121/1.4944570>
- Jaeggi SM, Buschkuhl M, Shah P, Jonides J (2014) The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Mem Cogn* 42:464–480. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z>
- Jafari MJ, Khosrowabadi R, Khodakarim S, Mohammadian F (2019) The effect of noise exposure on cognitive performance and brain activity patterns. *Open Access Maced J Med Sci* 7(17):2924–2931. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2019.742>
- Janssen SA, Vos H, Eisses AR, Pedersen E (2011) A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources. *J Acoust Soc Am* 130(6):3746–3753. <https://doi.org/10.1121/1.3653984>
- Jonker TR, Seli P, Cheyne JA, Smilek D (2013) Performance reactivity in a continuous-performance task: implications for understanding post-error behavior. *Conscious Cogn* 22(4):1468–1476. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.10.005>
- Keith SE, Feder K, Voicescu SA, Soukhovtsev V, Denning A, Tsang J, Broner N, Richarz W, van den Berg F (2016) Wind turbine sound power measurements. *J Acoust Soc Am* 139(3):1431–1435. <https://doi.org/10.1121/1.4942405>
- Kim HY (2013) Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis. *Restor Dent Endod* 38(1):52–54. <https://doi.org/10.5395/rde.2013.38.1.52>
- Klichowski M (2024) Efekt neuro. *Pedagogika i uwodzenie umyslow*. Adam Mickiewicz University Press. <https://doi.org/10.14746/amup.9788323242765>
- Klichowski M, Krolczak G (2020) Mental shopping calculations: a transcranial magnetic stimulation study. *Front Psychol* 11:1930. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01930>
- Klichowski M, Wicher A, Kruzwicka A, Golebiewski R (2023) Reverse effect of home-use binaural beats brain stimulation. *Sci Rep* 13:11079. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38313-4>
- Knopper LD, Ollson CA (2011) Health effects and wind turbines: a review of the literature. *Environ Health* 10:78. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-78>
- le Maitre J, Ryan G, Power B (2024) Do concerns about wind farms blow over with time? Residents' acceptance over phases of project development and proximity. *Renew Sustain Energy Rev* 189:113839. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113839>
- Lenth R (2020) emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means [R package]. Available from: <https://cran.r-project.org/package=emmeans>
- Liang P, Li J, Li Z, Wei J, Li J, Zhang S, Xu S, Liu Z, Wang J (2024) Effect of low-frequency noise exposure on cognitive function: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health* 24(1):125. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-17593-5>
- Lovibond SH, Lovibond PF (1995) Manual for the Depression Anxiety Stress Scales, 2nd edn. Psychology Foundation of Australia, Sydney
- Lundheim SH, Pellegrini-Masini G, Klockner CA, Geiss S (2022) Developing a theoretical framework to explain the social acceptability of wind energy. *Energies* 15(14):4934. <https://doi.org/10.3390/en15144934>
- Majjala PP, Kurki I, Vainio L, Pakarinen S, Kuuramo C, Lukander K, Virkkala J, Tiippana K, Stickler EA, Sainio M (2021) Annoyance, perception, and physiological effects of wind turbine infrasound. *J Acoust Soc Am* 149(4):2238–2248. <https://doi.org/10.1121/10.0003509>
- Makara-Studzinska M, Tyburski E, Zaluski M, Adamczyk K, Mesterhazy J, Mesterhazy A (2022) Confirmatory factor analysis of three versions of the depression anxiety stress scale (DASS-42, DASS-21, and DASS-12) in Polish adults. *Front Psychiatry* 12:770532. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.770532>
- Malecki P, Pawlaczek-Luszczynska M, Wszolek T, Preis A, Klaczynski M, Dudarewicz A, Pawlik P, Stepień B, Mleczko D (2023) Does stochastic and modulated wind turbine infrasound affect human mental performance compared to steady signals without modulation? Results of a pilot study. *Int J Environ Res Public Health* 20(3):2223. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032223>
- Marshall NS, Cho G, Toelle BG, Tonin R, Bartlett DJ, D'Rozario AL, Evans CA, Cowie CT, Janev O, Whitfield CR, Glozier N, Walker BE, Killick R, Welgampola MS, Phillips CL, Marks GB, Grunstein RR (2023) The health effects of 72 h of simulated wind turbine infrasound: a double-blind randomized crossover study in noise-sensitive, healthy adults. *Environ Health Perspect* 131(3):037012. <https://doi.org/10.1289/EHP10757>
- Martinez A, Iglesias G (2024) Global wind energy resources decline under climate change. *Energy* 288:129765. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129765>
- McCunney RJ, Mundt KA, Colby WD, Dobie R, Kaliski K, Blais M (2014) Wind turbines and health: a critical review of the scientific literature. *J Occup Environ Med* 56(11):e108–e130. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000313>
- McKenna R, Lilliestam J, Heinrichs HU, Weinand J, Schmidt J, Staffell I, Hahmann AN, Burgherr P, Burdack A, Bucha M, Chen R, Klingler M, Lehmann P, Lowitzsch J, Novo R, Price J, Sacchi R, Scherhauser P, Scholl EM, Visconti P, Velasco-Herrejon P, Zeyringer M, Camargo LR (2025) System impacts of wind energy developments: Key research challenges and opportunities. *Joule* 9(1):101799. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.11.016>
- McQuarrie EF, Mick DG (1992) On resonance: a critical pluralistic inquiry into advertising rhetoric. *J Consum Res* 19(2):180–197. <https://doi.org/10.1086/209295>
- Merino-Martinez R, Pieren R, Schaffer B (2021) Holistic approach to wind turbine noise: From blade trailing-edge modifications to annoyance estimation. *Renew Sustain Energy Rev* 148:111285. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111285>
- Michaud DS, Feder K, Keith SE, Voicescu SA, Marro L, Than J, Guay M, Denning A, McGuiere D, Bower T, Lavigne E, Murray BJ, Weiss SK, van den Berg F (2016) Exposure to wind turbine noise: perceptual responses and reported health effects. *J Acoust Soc Am* 139(3):1443–1454. <https://doi.org/10.1121/1.4942391>
- Michaud DS, Guay M, Keith SE, Denning A, McNamee JP (2025) An analysis of self-reported sleep disturbance from nighttime wind turbine noise suggests minimal effects but highlights the need for standardization in research design. *J Acoust Soc Am* 157(1):275–287. <https://doi.org/10.1121/10.0034710>
- Miedema HM, Vos H (1999) Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *J Acoust Soc Am* 105(6):3336–3344. <https://doi.org/10.1121/1.424662>
- Miedema HM, Vos H (2003) Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *J Acoust Soc Am* 113(3):1492–1504. <https://doi.org/10.1121/1.1547437>
- Muller L, Forssen J, Kropp W (2023) Traffic noise at moderate levels affects cognitive performance: do distance-induced temporal changes matter? *Int J Environ Res Public Health* 20(5):3798. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053798>
- Mutschler I, Wieckhorst B, Speck O, Schulze-Bonhage A, Hennig J, Seifritz E, Ball T (2010) Time scales of auditory habituation in the amygdala and cerebral cortex. *Cereb Cortex* 20(11):2531–2539. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq001>
- Natarajan N, Batts S, Stankovic KM (2023) Noise-induced hearing loss. *J Clin Med* 12(6):2347. <https://doi.org/10.3390/jcm12062347>
- Ni K, Huang Y (2022) An investigation of the age effect on acoustical annoyance developed from data of previous studies. *Appl Acoust* 192:108720. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108720>

- Obuseh E, Eyenubu J, Alele J, Okpare A, Oghogho I (2025) A Systematic review of barriers to renewable energy integration and adoption. *J Asian Energy Stud* 9:26–45. <https://doi.org/10.24112/jaes.090002>
- Okada Y, Sakamoto S, Fukushima A (2020) Field measurements of sound power spectrum for predicting road traffic noise. *Acoust Sci Technol* 41(3):622–625. <https://doi.org/10.1250/ast.41.622>
- Pieper K, Spang RP, Prietz P, Moller S, Paajanen E, Vaalgamaa M, Voigt-Antons JN (2021) Working with environmental noise and noise-cancellation: a workload assessment with EEG and subjective measures. *Front Neurosci* 15:771533. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.771533>
- Pierpont N (2009) Wind turbine syndrome: a report on a natural experiment. K-Selected Books, Santa Fe, NM
- Pleban D, Kapica L, Szczepanski G, Radosz J, Alikowski A, Lada K (2024) Wind turbine noise annoyance due to ability of employee to carry out his basic tasks. *Rynek Energii* 2:74–81
- Pohl J, Gabriel J, Hubner G (2018) Understanding stress effects of wind turbine noise—the integrated approach. *Energy Policy* 112:119–128. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>
- R Core Team (2021) R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 4.1) [Computer software]. Available from: <https://cran.r-project.org> (R packages retrieved from MRAN snapshot 2022-01-01)
- Rabbani MR, Kiran M, Shaikh ZH (2025) Financing the future: Insights into sustainable energy investments through scientific mapping and meta-analysis. *Discov Sustain* 6:34. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00788-0>
- Radon S (2014) Kwestionariusz Ruminacji-Refleksyjności (polska adaptacja The Rumination-Reflection Questionnaire). *Psychoterapia* 2(169):61–72
- Radun J, Maula H, Saarinen P, Keranen J, Alakoivu R, Hongisto V (2022) Health effects of wind turbine noise and road traffic noise on people living near wind turbines. *Renew Sustain Energy Rev* 157:112040. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112040>
- Ramvalho E, Lima F, Lopez-Maciel M, Madaleno M, Villar J, Dias MF, Botelho A, Meireles M, Robaina M (2025) Understanding wind energy economic externalities impacts: a systematic literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 209:115120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115120>
- Raven J (2009) The Raven Progressive Matrices and measuring aptitude constructs. *Int J Educ Psychol Assess* 2:2–38
- Robertson IH, Manly T, Andrade J, Baddeley BT, Yiend J (1997) ‘Oops!': Performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia* 35(6):747–758. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00015-8)
- Schaffer B, Pieren R, Heutschi K, Wunderli JM, Becker S (2021) Drone noise emission characteristics and noise effects on humans—a systematic review. *Int J Environ Res Public Health* 18(11):5940. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115940>
- Schaffer B, Schlittmeier SJ, Pieren R, Heutschi K, Brink M, Graf R, Hellbruck J (2016) Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: a laboratory study. *J Acoust Soc Am* 139(5):2949–2963. <https://doi.org/10.1121/1.4949566>
- Schmidt JH, Klokke M (2014) Health effects related to wind turbine noise exposure: a systematic review. *PLoS ONE* 9(12):e114183. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114183>
- Shepherd D, McBride D, Welch D, Dirks KN, Hill EM (2011) Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise Health* 13(54):333–339. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.85502>
- Singmann H (2018) afex: analysis of factorial experiments [R package]. Available from: <https://cran.r-project.org/package=afex>
- Smith MG, Ogren M, Thorsson P, Hussain-Alkhatieb L, Pedersen E, Forssen J, Ageborg Morsing J, Persson Wayne K (2020) A laboratory study on the effects of wind turbine noise on sleep: Results of the polysomnographic WiTNES study. *Sleep* 43(9):zsaa046. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa046>
- Soeta Y, Onogawa E (2023) Physiological evaluations of low-level impulsive sounds generated by an air conditioner. *Front Psychol* 14:1128752. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1128752>
- Stoet G (2010) PsyToolkit: a software package for programming psychological experiments using Linux. *Behav Res Methods* 42(4):1096–1104. <https://doi.org/10.3758/brm.42.4.1096>
- Stoet G (2017) PsyToolkit: a novel web-based method for running online questionnaires and reaction-time experiments. *Teach Psychol* 44(1):24–31. <https://doi.org/10.1177/0098628316677643>
- Szychowska M, Hafke-Dys H, Preis A, Kocinski J, Kleka P (2018) The influence of audio-visual interactions on the annoyance ratings for wind turbines. *Appl Acoust* 129:190–203. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.08.003>
- Takeuchi A (2023) Social dimensions of offshore wind energy: a review of theories and frameworks of multi-criteria decision-making. *Curr Sustain/Renew Energy Rep* 10(4):243–249. <https://doi.org/10.1007/s40518-023-00225-2>
- Talarek K, Knitter-Piatkowska A, Garbowski T (2022) Wind parks in Poland—new challenges and perspectives. *Energies* 15:7004. <https://doi.org/10.3390/en15197004>
- Taylor J, Eastwick C, Wilson R, Lawrence C (2013) The influence of negative oriented personality traits on the effects of wind turbine noise. *Pers Individ Differ* 54(3):338–343. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2012.09.018>
- Thalbourne MA, Houran J (2000) Transliminality, the Mental Experience Inventory and tolerance of ambiguity. *Pers Individ Differ* 28(5):853–863. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(99\)00143-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(99)00143-9)
- The jamovi project (2022) jamovi (Version 2.3) [Computer Software]. Available from: <https://www.jamovi.org>
- Thomsen DK, Jensen AB, Jensen T, Mehlsen MY, Pedersen CG, Zachariae R (2013) Rumination, reflection and distress: an 8-month prospective study of colon-cancer patients. *Cogn Ther Res* 37:1262–1268. <https://doi.org/10.1007/s10608-013-9556-x>
- Tomczak M, Tomczak E, Kleka P, Lew R (2014) Using power analysis to estimate appropriate sample size. *Trends Sport Sci* 4(21):195–206
- Torija AJ, Nicholls RK (2022) Investigation of metrics for assessing human response to drone noise. *Int J Environ Res Public Health* 19(6):3152. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063152>
- Trapnell PD, Campbell JD (1999) Private self-consciousness and the five-factor model of personality: Distinguishing rumination from reflection. *J Pers Soc Psychol* 76(2):284–304. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.76.2.284>
- Tsionas I, Llaguno-Munitxa M, Stephan A (2025) Environmental effects of urban wind energy harvesting: A review. *Build Cities* 6(1):1–24. <https://doi.org/10.5334/bc.491>
- Turi Z, Csifcsak G, Boayue NM, Aslaksen P, Antal A, Paulus W, Groot J, Hawkins GE, Forstmann B, Opitz A, Thielscher A, Mittner M (2019) Blinding is compromised for transcranial direct current stimulation at 1 mA for 20 min in young healthy adults. *Eur J Neurosci* 50(8):3261–3268. <https://doi.org/10.1111/ejn.14403>
- van Kamp I, van den Berg F (2021) Health effects related to wind turbine sound: an update. *Int J Environ Res Public Health* 18(17):9133. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179133>
- van Son D, De Blasio FM, Fogarty JS, Angelidis A, Barry RJ, Putman P (2019) Frontal EEG theta/beta ratio during mind wandering episodes. *Biol Psychol* 140:19–27. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.11.003>
- Voicescu SA, Michaud DS, Feder K, Marro L, Than J, Guay M, Denning A, Bower T, van den Berg F, Broner N, Lavigne E (2016) Estimating annoyance to calculated wind turbine shadow flicker is improved when variables associated with wind turbine noise exposure are considered. *J Acoust Soc Am* 139(3):1480–1492. <https://doi.org/10.1121/1.4942403>
- Woodland L, Minkin M, Fenech B (2024) Health effects related to wind turbine sound—a rapid evidence review covering 2020–2024. In: INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (pp. 7685–7696), Institute of Noise Control Engineering, Nantes. https://doi.org/10.3397/IN_2024_3994
- Yokoyama S, Sakamoto S, Tachibana H (2014) Perception of low frequency components in wind turbine noise. *Noise Control Eng J* 62(5):295–305. <https://doi.org/10.3397/1/376228>
- Yonemura M, Sakamoto S (2025) Subjective evaluation of loudness of noise containing a low-frequency tonal component. *Appl Acoust* 229:110380. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110380>
- Zhang J, Pang L, Yang C, Fan Y, Zhao B, Cao X (2024) Experimental evaluation of noise exposure effects on subjective perceptions and Cognitive performance. *Buildings* 14(4):1100. <https://doi.org/10.3390/buildings14041100>

Acknowledgements

This research was made possible through the support of the EEA and Norway Grants project: *Healthy society – towards optimal management of wind turbines' noise* (NOR/POLNOR/Hetman/0073/2019-00). During the preparation of this manuscript, AR received support from the European Cooperation in Science and Technology (COST) grant: *A European consortium to determine how complex, real-world environments influence brain development (ENVIRO-DEV)* (CA22111). Concurrently, TP and MK were supported by the *advancing Social inclusion through Technology and EmPowerment (a-STEP)* COST Action (CA19104). MK also acknowledges the support by the *Do we need the recognition of neurorights? The scope of State and business actors' human rights obligations in the area of neurotechnologies* National Science Centre (Poland) grant (2023/49/B/HS5/02139). The open access fee was funded by The Excellence Initiative—Research University (ID-UB) program at Adam Mickiewicz University, Poznan.

Author contributions

MK and AR conceived the study. AR, MK, AW, and MB designed the experiment. AR, AK, TP, GD-K, and MK performed the experiment. AR and MK analyzed the data, with GD-K and BBN aiding in data preparation. MK and AR wrote the manuscript with input from AW and MB, while AK prepared the figures. MK supervised the project's development at all stages and revised the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests. However, MK was a Collection Guest Editor for this journal at the time of acceptance for publication. The manuscript was assessed in line with the journal's standard editorial processes, including its policy on competing interests.

Ethical approval

This study was performed in line with the principles of the Declaration of Helsinki. Approval was granted by the Ethics Committee of the Faculty of Educational Studies at Adam Mickiewicz University, Poznan, on December 12, 2022 (Ethical Approval No. WSE-KEdsPB-03/2022/2023).

Informed consent

All participants provided written informed consent prior to the experiment.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to Agnieszka Rosciszewska or Michal Klichowski.

Reprints and permission information is available at <http://www.nature.com/reprints>

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which permits any non-commercial use, sharing, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if you modified the licensed material. You do not have permission under this licence to share adapted material derived from this article or parts of it. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

© The Author(s) 2025

METHOD FOR DETERMINING THE THRESHOLD OF WIND TURBINE NOISE MASKING BY HIGHWAY NOISE AS FUNCTION OF DISTANCE

Buszkiewicz Maciej^{1*} Wicher Andrzej¹ Pyffel Remigiusz¹

¹Department of Acoustics, Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University in Poznan, Poland

ABSTRACT*

Series of 4 experiments were conducted with use of 2-alternative forced choice (2AFC) method to determine the threshold of wind turbine noise perception amid masker. In each iteration two samples were presented. Masking noise (highway) was present in both samples, whereas wind turbine noise against the masker was present in only one.

Samples of wind turbine noise were prepared based on an actual recording at 150m from source. Using the transfer function based on the Nord2000 methodology, a set of samples reflecting the sounds of the wind turbine at distances 150 m – 2 150 m between observer and source point (with 10 m step) were created. Samples of masking noise were prepared for 4 distances of 250 m, 500 m, 1 000 m and 2 000 m between observer and source point. For each masking noise sample separate experiment was prepared. During experiments the subjects were asked to indicate the sample which was more annoying. No information about the sources were given. Authors adopted the hypothesis that samples containing wind turbine noise would be indicated as more annoying. Depending on the given answers, the wind turbine noise sample distance from subject was adjusted. Masking noise was presented each time at one of 4 fixed distances. Average of 5 last turn points was assumed as distance threshold for wind turbine noise masking. The results obtained from the study indicate that wind turbine noise is effectively masked by road traffic noise, especially when the turbine is located at distances of up to about 500 m relative to traffic noise sources. On the other hand, for the location of the wind turbine relative to the road traffic noise source at distances (above about

500 m), the effectiveness of masking by road noise decreases significantly

Keywords: wind turbine noise, annoyance, masking threshold.

1. INTRODUCTION

Wind power is considered a “green-energy” for being low- / zero-emission, renewable source of electricity. Thus the large-scale use of wind turbines is an opportunity to alleviate the climate crisis. Simultaneously wind turbines generate noise which many find annoying [1-3]. One of the main causes of annoyance in wind turbine noise (WTN) are so-called amplitude modulations [4, 5]. For masking this type of noise one should select a masker with similar time-pattern (presumably “AM-like” characteristics), similar spectrum, low-annoyance and available near wind farm sites. Although road traffic noise (RTN) is potentially good choice for WTN masker it’s effectiveness is not well determined [6]. Presented method aims for defining the potential of WTN masking by road traffic sounds with combination of WTN detection threshold. WTN detection is assessed by identifying sounds that are more annoying rather than directly asking for WTN indication, which can be successfully done even with very low SNR [7]. Moreover subjects are not being informed about the sound sources to reduce the influence of non-acoustical factors (e.g. prejudice towards wind turbine technology) on their responses. Detection by annoyance is more believed by the Authors as more “natural” way of perceiving environmental sounds.

*Corresponding author: maciej.buszkiewicz@amu.edu.pl

Copyright: ©2023 Maciej Buszkiewicz et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Sound recordings and measurements

2.1.1 Wind turbine noise

WTN recordings were gathered during measurement campaign on wind farm in Lodz Voivodeship in central Poland. Noise was measured from single 2.0 MW wind turbine with 90 m diameter rotor and nacelle located at height of 105 m. Receiver was located 150 m from wind turbine tower, on downwind side. Recordings were done using RODE NTSF1 ambisonics microphone at 1.5 m height with Squadriga II recorder. Sound levels were measured with SVAN 979 Class 1 sound level meter. Weather conditions during recordings were stable with wind speed 4 m/s at 11 m (meteorological station) and 7 m/s at hub height. Terrain at wind farm location was flat, covered with compacted earth with occasional gravel and asphalt roads. WTN 5-minute equivalent sound pressure level of recorded signal was $L_{eq} = 49.1$ dBA. During recording session wind turbine rotation frequency was 0.8 Hz. WTN 1/3 octave band spectrum is depicted in Figure 1.

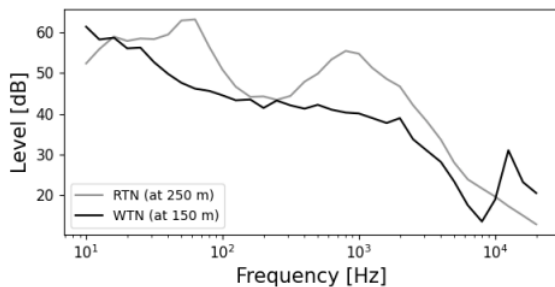


Figure 1. WTN and RTN 1/3 octave band spectra at different distances: 150 m and 250 m respectively.

2.1.2 Road traffic masking noise

RTN recordings were gathered by A2 highway close to Poznan (Poland) during rush-hours (15:00-17:00) on Friday. The traffic volume was 4 860 vehicles per hour with ratio of 82.3% light vehicles (passenger cars and small trucks) and 17.7% of heavy vehicles. No motorcycles were observed during recordings. Noise of steady vehicle flow was measured at 1.5 m height using the same recording setup as for WTN recordings (RODE NTSF1 ambisonics and Squadriga II recorder) within 3 distances perpendicular to highway axis: 25 m, 250 m and 500 m from the middle of external road lane. Sound levels were obtained by SVAN 979 Class 1 sound level meter. Weather conditions

during recording session were alike to conditions for WTN recordings with the difference that no wind was present at RTN site (max wind speed <1 m/s). Measurement points were located along flat dirt road around which terrain was covered with packed earth. RTN 5-minute equivalent sound pressure levels were $L_{eq} = 60.5$ dBA at 250 m and $L_{eq} = 56.9$ dBA at 500 m. 1/3 octave band spectrum of RTN at 250 m is shown in Figure 1 with WTN spectrum at 150 m for depiction of dominant frequency bands distribution.

2.2 Preparation of sound samples

As the distance between the observation point (so-called “0 m point”) and the source changes, and so is the samples sound spectrum. This stem from a variety of mechanisms along propagation path, with two main being the absorption of sound energy in the air and the sound reflections from the ground surface.

The full-sphere ambisonics audio recordings were converted into dual-channel stereo wav files. Subsequently, for each measuring distance or noise source, 10 exemplary “source point samples” of 8-second length were selected: from WTN recordings captured at a distance of 150 m and from RTN recordings obtained at distances of 250 m and 500 m. In order to reflect the effect of distance alterations by means of spectral structure of sound, source samples were filtered with transfer functions.

Transfer functions were created using the Nord2000 [8] methodology. Main input data for the model were: height of sound source and receiver, horizontal distance between both points, weather parameters including wind speed, wind direction (downwind), air temperature, humidity, landform and terrain type along the propagation path.

Transfer functions calculated based on Nord2000 methodology resulted in 1/3 octave bands spectra of 20 Hz – 10 000 Hz center frequency range indicating attenuation on propagation path. Attenuation spectra resulting from transfer functions were treated as band-pass filters which source signals were processed with. By changing horizontal distance between source and receiver (while keeping the remaining parameters unchanged) Authors managed to calculate set of transfer functions suiting the needs of experiments.

For WTN samples 200 transfer functions, corresponding to distances 0 m to 2 000 m between source and observation point, with 10 m step, were calculated. Processing WTN source samples with transfer functions resulted in generating samples for artificial source locations ranging from 150 m (original recording) to 2 150 m from the original location of wind turbine.

For additional RTN samples 2 transfer functions were calculated: for distance 500 m and 1 500 m between source and observation point. Thus RTN samples for experiments consisted of 4 distances: 250 m, 500 m, 1 000 m and 2 000 m. First two samples were original recordings, and two latter were created by filtering 500 m recording with mentioned transfer functions.

Filtering procedures, on the base of the Nord2000, were performed repeatedly for each of 10 source samples and each measuring distances of WTN and RTN. Table 1. presents detailed data considering sample preparation.

Table 1. Sample preparation details.

Criterion	WTN samples	RTN samples
Number of source point samples	10	10 + 10
Measuring distances [m]	150	250, 500
Number of transfer functions	200	2
Transfer function distances [m]	0 – 2 000 (10 m step)	500, 1 500
Distances between observation point and artificial source points [m]	150 – 2 150 (10 m step)	250, 500, 1 000, 2 000
Number artificial source points	2 000	40

2.3 Laboratory experiment

The experiment was divided into 4 separate sessions within which multiple trials were performed. Each session was dedicated to different masking signal (RTN) presented at different distance: 250 m, 500 m, 1000 m or 2000 m. During sessions masker distances were constant while WTN source point distance was changing according to subjects answers. The subject's task during each trial was to compare 2 listened samples and indicate which one was more annoying. The assumption was made that samples containing wind turbine signals present higher annoyance therefore their indication was treated as the correct response. Subjects were not informed about the sound sources contained in listened samples to nullify the influence of non-acoustical factors such as bias or aversion towards RTN or WTN. Subjects were instructed that selection is purely subjective and when unsure are asked to answer at random.

2.3.1 Experiment procedure

In study sessions two-alternative forced choice (2AFC) method with the 2 up/1 down adaptive procedure was used. Trials consisted of two 8-second samples containing: (1) wind turbine signal against masker and (2) solely masking signal. In each trial samples were presented at random order with 1 second of silence between sample presentation.

According to given responses procedure was adjusting the signal-to-masker ratio (SMR) which corresponded to the distance between the wind turbine and the observation point. If the subject indicated a sound sample containing the sound of a wind turbine (correct response), the SMR was reduced by presenting WTN further from observation point in next trial with current distance shift step (DSS). When response was incorrect procedure increased SMR by presenting WTN signal closer to the observation point with current DSS. DSS was decreasing every time procedure obtained a turning point (changing the trend of responses from correct to incorrect or vice versa). DSS were 150 m, 50 m and 20 m. When DSS dropped to 20 m it stopped decreasing. Session continued until obtaining 5 more turning points. Average value of last 5 turning points obtained for smallest DSS corresponded to the distance between the observer point and the WTN source point at which the subject was unable to assess the differences in the annoyance of the presented pair of sound samples. This value was considered as WTN amid RTN masker detection threshold. Experiment procedure were created and conducted with PsychoPy software [9].

2.3.2 Subjects

In experiment took part 17 subjects in age group 18 – 30 years. Every subject had it's hearing tested by pure-tone audiometry. All subjects had normal hearing. Subjects were instructed about task before each experiment. No information about origins of sound samples, neither WTN signal nor RTN masker, was given. Subjects were informed that at any time during experiments they can stop the procedure and between each experiment 5-minute breaks were conducted. Subjects were paid for participation in the study.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Using the IBM SPSS v.28 software, an ANOVA analysis of variance was carried out on the obtained experimental results. The dependent variable was the minimum distance between the observer and the wind turbine determined by the subject, for which the differences in the annoyance

sensations of the compared sounds (RTN and RTN+WTN) were just perceived. Referring to the research methodology used, it can be assumed that above the experimentally determined distance the wind turbine noise is completely masked by road traffic noise. The fixed factor was the distance between the traffic noise source and the wind turbine (RTN distance), while the subject factor was a random factor. The analyzes were performed at the significance level of $p=0.05$.

The results of the analysis of variance showed that RTN distance was a statistically significant factor $F(3, 47) = 12.499, p < 0.001$. In addition, the subject factor also proved statistically significant $F(16, 47) = 2.150, p < 0.001$.

Figure 1 shows the relationship between the mean Threshold distance of WTN annoyance, and RTN distance.

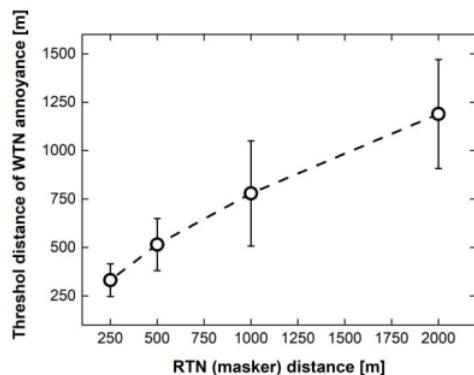


Figure 2. Relationship between mean Threshold distance of WTN annoyance, and RTN distance. Error bars indicate 95% confidence intervals.

As part of the statistical analyses, a post hoc test, the Tukey test, was also performed. Tukey's test results showed that RTN significantly affects the average thresholds of distance of WTN annoyance. Increasing the RTN distance significantly increases the average values of the measured thresholds of WTN annoyance as the function of the distance.

It should be noted that as RTN distance increases, the value of the confidence interval increases. This means that for larger distances of the wind turbine from the traffic noise source, the comparison of annoyance between wind turbine noise and turbine vs. road noise becomes quite a difficult task.

This is primarily due to the decrease in noise levels with distance and the reduction in the frequency range of the spectra of the compared stimuli.

In summary, the results obtained from the study indicate that wind turbine noise is effectively masked by road traffic

noise, especially when the turbine is located at distances of up to about 500 m relative to traffic noise sources. On the other hand, for the location of the wind turbine relative to the road traffic noise source at distances (above about 500 m), the effectiveness of masking by road noise decreases significantly. The research results presented in this paper refer to one of many stages of experimental study. Further stages of the research will take into account different sound samples of the maskers, i.e. recorded road noise from different times of the day and night. In addition, recordings of wind turbine noise with varying amplitude modulation rates will be included in future stages of the work.

4. CONCLUSIONS

Areas in close neighborhoods to roads with heavy traffic are exposed to high levels of noise and are most often excluded from residential development plans. The results of the present study showed that road noise is an effective masker for wind turbine noise, especially when the distance between the wind turbine and the road is no more than 500 m. The effectiveness of traffic noise masking decreases when the wind turbine is located at distances greater than 500 m from the road noise source.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out as part of the Polish-Norwegian project NOR/POLNOR/Hetman/0073/2019-00.

6. REFERENCES

- [1] E. Pedersen and K. Persson Waye, "Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship," *J Acoust Soc Am*, vol. 116, no. 6, pp. 3460–3470, 2004.
- [2] C. Hansen and K. Hansen, "Recent Advances in Wind Turbine Noise Research," *Acoustics*, vol. 2, no. 1, pp. 171–206, Mar. 2020
- [3] M. Pawlaczyk-Luszczyńska, A. Dudarewicz, K. Zaborowski, M. Zamojska-Daniszewska, and M. Waszkowska, "Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: A pilot study," *Int J Occup Med Environ Health*, vol. 27, no. 3, pp. 364–388, 2014,
- [4] S. Lee, K. Kim, W. Choi, and S. Lee, "Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise," *Noise Control Eng J*, vol. 59, no. 1, pp. 38–46, Jan. 2011

- [5] K. L. Hansen, P. Nguyen, G. Micic, B. Lechat, P. Catcheside, and B. Zajamšek, “Amplitude modulated wind farm noise relationship with annoyance: A year-long field study,” *J Acoust Soc Am*, vol. 150, no. 2, pp. 1198–1208, Aug. 2021,
- [6] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, and J. Bouma, “Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2520–2527, May 2010.
- [7] T. Van Renterghem, A. Bockstael, V. De Weirt, and D. Botteldooren, “Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise,” *Sci Total Environ*, vol. 456–457, pp. 333–345, Jul. 2013,
- [8] B. Plovsing, “Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction,” *Delta*, pp. 1–127, 2001.
- [9] J. Peirce *et al.*, “PsychoPy2: Experiments in behavior made easy,” *Behav Res Methods*, vol. 51, no. 1, pp. 195–203, Feb. 2019,