

---

---

# XXVIII KONFERENCJA INŻYNIERII AKUSTYCZNEJ I BIOMEDYCZNEJ

---

---

ORGANIZOWANA PRZEZ  
**Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie**  
ORAZ  
**Katedrę Mechaniki i Wibroakustyki, AGH w Krakowie**

MATERIAŁY KONFERENCYJNE

KRAKÓW – ZAKOPANE  
21 – 24 KWIETNIA 2026

## Komitet Naukowy

**Janusz Piechowicz** – *Przewodniczący*

Wojciech Batko

Dariusz Bismor

Adam Brański

Ireneusz Czajka

Rafał Delekta

Tadeusz Kamisiński

Iwona Kochańska

Janusz Kompała

Mirosław Meissner

Artur Nowoświat

Krzysztof Opieliński

Paweł Pawlik

Adam Pilch

Dariusz Pleban

Marek Pluta

Wojciech Rdzanek

Bartłomiej Stępień

Jerzy Wiciak

Tadeusz Wszolek

Wiesław Wszolek

## Komitet Organizacyjny

**Marek Pluta**

– *Przewodniczący*

Bartłomiej Chojnacki

Ireneusz Czajka

Karol Czesak

Michał Gurgul

Janusz Piechowicz

Adam Pilch

Bartłomiej Stępień

Katarzyna Suder-Dębska

Roman Trojanowski

Tadeusz Wszolek

## **Streszczenia referatów**



## Sto lat historii operacji matematycznych na decybelach i ich ostatnie modyfikacje

*A century of history of mathematical operations on decibels and their recent modifications*

Wojciech Batko<sup>\*,\*\*</sup>, Adam Jabłoński\*

batko@agh.edu.pl, ajab@agh.edu.pl

\*AGH w Krakowie, \*\*Academy of Applied Sciences in Krosno

Referat skupia uwagę na zagadnieniach metodycznych obecnych w modelowaniu i obliczeniach zagrożeń akustycznych w środowisku, realizowanych na liczbach decybelowych, które zgodnie z psychoakustycznym prawem Webera–Fechnera opisuje warunki percepcji przez człowieka analizowanych zjawisk. Przedstawia genezę decybeli w akustyce, począwszy od 1924 roku oraz rys historyczny operacji matematycznych, głównie dodawania decybeli. Punktuje, znaczenie tych operacji dla procesu matematycznego modelowania rozpoznawanych zagrożeń akustycznych środowiska (ZAŚ).

Wykonany przegląd archiwów wskazuje, że inżynierowie i naukowcy od ubiegłego wieku opracowywali coraz to bardziej użyteczne nomogramy, umożliwiające szybkie wykonywanie wielokrotnych operacji dodawania i odejmowania decybeli. Ich prezentacja, obejmuje oryginalne dokonania wybitnych akustyków jak: Beranek, Peterson, Harris, Bell, Bennett, Irwin, Graf, Kinsler, Jokel, Miller oraz zbiorowe prace inżynierskie wydawane w latach 70-tych przez HEWELETT PACKARD i NASA. Prezentowane rozwiązania obliczeniowe przyporządkowane relacjom na liczbach decybelowych nie tworzą jednak poprawnej algebry operacji przypisanych procesom identyfikacji zagrożeń akustycznych środowiska.

Zaproponowana przez W. Batko korektą aksjomatu dodawania liczb decybelowych pozwoliła na wyeliminowanie ograniczeń obecnych operacji algebraicznych na liczbach decybelowych i powiązanych z nimi błędów interpretacyjnych. Umożliwiła stworzenie użytecznego narzędzia do identyfikacji stawianych w diagnostyce zagrożeń akustycznych pytań, dedukcyjną drogą poznawczą.

*This paper focuses on methodological issues involved in modeling and calculating environmental noise hazards based on decibel values, which, in accordance with Weber–Fechner’s psychoacoustic law, describe the conditions under which humans perceive the phenomena under analysis. It presents the origins of the decibel in acoustics, beginning in 1924, and a historical overview of mathematical operations, primarily the addition of decibels. It highlights the significance of these operations for the mathematical modeling of recognized environmental noise hazards (ZAŚ).*

*A review of the archives indicates that engineers and scientists since the last century have developed increasingly useful nomograms, enabling the rapid performance of multiple operations of adding and subtracting decibels. Their presentation includes the original achievements of prominent acousticians such as: Beranek, Peterson, Harris, Bell, Bennett, Irwin, Graf, Kinsler, Jokel, Miller, as well as collective engineering works published in the 1970s by Hewlett-Packard and NASA. However,*

*the presented computational solutions associated with relations on decibel numbers do not form a valid algebra of operations assigned to the processes of identifying environmental acoustic hazards.*

*The correction to the axiom of addition of decibel numbers proposed by W. Batko made it possible to eliminate the limitations of current algebraic operations on decibel numbers and the associated interpretive errors. It enabled the creation of a useful tool for identifying questions posed in the diagnosis of acoustic hazards through a deductive cognitive process.*

## **Drgania kości skroniowej podczas stymulacji przewodnictwem kostnym na kapsule błędnika**

*Temporal bone vibrations during bone conduction stimulation on the otic capsule*

*Paweł Borkowski\**, *Robert Zablotni\*\**, *Andrzej Kucharski\*\*\**, *Marcin Szymański\*\*\**,  
*Rafał Rusinek\*\**

*pawel.borkowski@pw.edu.pl*

\*Politechnika Warszawska, \*\*Politechnika Lubelska,

\*\*\*Uniwersytet Medyczny w Lublinie

Drgania ucha wewnętrznego człowieka względem otaczającej kości czaszki, występujące podczas stymulacji przewodnictwem kostnym umieszczonej blisko ślimaka, są związane z odczuwaniem dźwięku i wpływają na skuteczność leczenia niedosłuchu. Połączone badanie eksperymentalne i numeryczne dotyczyło dwóch kości skroniowych pobranych ze zwłok – pierwszą zawieszono na linkach dakronowych, drugą otoczono plastyczną masą na specjalnie opracowanym stanowisku. System wzbudzania składał się z wzbudnika, pręta i dwóch typów trzpieni. Pierwsza próbkę wykorzystano do identyfikacji postaci drgań. Drugą próbkę poddano stymulacji przewodnictwem kostnym w dwóch kierunkach, lekko odchylonych od kierunku prostopadłego do okienka okrągłego. Jednowymiarowy wibrometr laserowy Dopplera mierzył prędkości promontorium, stopki strzemiączka, błony okienka okrągłego oraz kilku punktów na wyrostku sutkowatym. Model metody elementów skończonych symulował warunki testu w celu określenia przestrzennych składowych prędkości drgań i eliptycznych trajektorii ruchu dla drugiej próbki. Odpowiedź kości skroniowej była porównywalna dla obu kierunków stymulacji i zawierała znaczący ruch ciała sztywnego, spadający wraz z częstotliwością. Kryteria dotyczące różnicy pomiędzy całkowitymi prędkościami drgań kości, a odpowiadającymi im składowymi ruchami ciała sztywnego wykazały, że względny ruch kapsuły błędnika był z grubsza zgodny z wynikami opublikowanych pomiarów głów ludzkich ze zwłok przy stymulacji przewodnictwem kostnym przyłożonym na powierzchni czaszki. Wyniki pokazały, że zastosowanie elastycznego materiału tłumiącego drgania wzdłuż krawędzi kości skroniowej jest dobrym warunkiem brzegowym przy ocenie względnego ruchu kapsuły błędnika podczas stymulacji przewodnictwem kostnym umieszczonej w pobliżu ślimaka. Zastosowanie przewymiarowanego układu wzbudzenia było niekorzystne dla tego miejsca stymulacji i w dalszych badaniach wymaga użycia mniejszego przetwornika.

*Vibrations of the human inner ear relative to the surrounding skull bone, occurring with bone-conduction stimulation near the cochlea, are associated with perceived sound and affect the efficacy of hearing loss treatment. A combined experimental and numerical study included two cadaveric temporal bone specimens- the first suspended on dacron strings, the second surrounded by malleable putty on a specially developed setup. An excitation system included a shaker with a rod and two types of stingers. The first specimen was used to identify vibration modes. The second sample was subjected to bone-conduction stimulation in two directions, slightly tilted from*

*the direction perpendicular to the round window. One-dimensional laser Doppler vibrometry measured velocities at the promontory, the stapes footplate, the round window membrane, and at several points on the mastoid. A finite element model simulated the test conditions to determine spatial velocities and elliptical motion trajectories of the second specimen. The temporal bone response was comparable for both stimulation directions and included significant rigid-body motion that decreased with frequency. The rigid-body motion difference criteria showed that the relative movement of the otic capsule roughly matched those reported in published experimental measurements of cadaveric human heads during bone-conduction stimulation applied to the skull surface. The results showed that applying a flexible material that suppresses vibrations along the temporal bone edge provides a good boundary condition for assessing the relative movement of the otic capsule during bone-conduction stimulation near the cochlea. The use of an excessive excitation system was not advantageous for this stimulation site and requires a smaller transducer in further studies.*

## **Wpływ sposobu mocowania elementów lokalnie rezonansowych na efektywność metamateriałów wibroakustycznych**

*Influence of mounting method of locally resonant elements on metamaterial performance*

Klara Chojnacka

*klara.chojnacka@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Metamateriały wibroakustyczne z elementami lokalnie rezonansowymi stanowią skuteczne narzędzie redukcji drgań i hałasu. Mocowanie rezonatorów do przegrody prowadzi do powstawania przerw pasmowych, w których fale giętne propagujące się w przegrodzie są silnie tłumione. Zakres i skuteczność działania tych przerw zależy nie tylko od częstotliwości rezonansowych elementów, lecz także od charakteru ich sprzężenia z przegrodą. W konsekwencji efektywność metamateriału w redukcji drgań oraz zwiększaniu izolacyjności akustycznej jest determinowana nie tylko przez parametry geometryczne i materiałowe, ale również przez sposób mocowania elementów rezonansowych do płyty podstawowej.

W pracy przedstawiono analizę wpływu różnych metod mocowania, w tym połączeń klejonych, sztywnych oraz połączeń o kontrolowanej podatności, na skuteczność działania metamateriału. Przeprowadzono badania eksperymentalne impedancji punktu wzbudzenia układu w funkcji czasu od wykonania połączenia klejowego, wykazując zmienność parametrów dynamicznych struktury związaną z właściwościami warstwy łączącej. Zmiany te wpływają na częstotliwości rezonansowe oraz poziom tłumienia układu, a tym samym na efektywny zakres działania metamateriału.

Dodatkowo zaproponowano sposób modelowania wpływu materiału łączącego poprzez wprowadzenie efektywnych parametrów tłumienia do modeli numerycznych służących do oceny redukcji drgań i wzrostu izolacyjności akustycznej. Podejście to umożliwia uwzględnienie rzeczywistych właściwości połączeń w analizach numerycznych struktur metamateriałowych. Uzyskane wyniki wskazują, że sposób mocowania jest istotnym parametrem projektowym i może prowadzić do obniżenia skuteczności metamateriału, szczególnie w pobliżu częstotliwości rezonansowych.

*Vibroacoustic metamaterials with locally resonant elements are an effective solution for vibration and noise reduction. When resonant elements are attached to a host structure, they create band gaps in which flexural waves are strongly attenuated. The effectiveness of these band gaps depends not only on the resonant frequencies of the elements, but also on their dynamic interaction with the base structure. Therefore, metamaterial performance is governed not only by geometric and material parameters, but also by the mounting method.*

*This work investigates the influence of different mounting strategies, including adhesive bonding, rigid connections, and compliant interfaces, on the effectiveness of vibration reduction. Experimental measurements of driving-point impedance were carried out as a function of time after adhesive bonding, showing temporal changes*

*in the dynamic properties of the structure. These changes affect the resonance frequencies and damping level of the system, and consequently its performance within the target frequency range.*

*In addition, a modeling approach is proposed to include the effect of the bonding material by introducing effective damping parameters into numerical models used to predict vibration reduction and improvement of acoustic insulation. This makes it possible to account for realistic joint properties in numerical analyses of metamaterial structures. The results show that the mounting method is an important design parameter and may significantly reduce metamaterial performance, especially near resonance frequencies.*

## **Zastosowanie w dydaktyce metod problemowych (PBL) wspomaganych dedykowanymi modelami GenAI – przykład wykorzystania w nauczaniu w zakresie elektroakustyki i akustyki małych pomieszczeń**

*Application of Problem-Based Learning (PBL) supported by dedicated generative AI models: a case study in teaching electroacoustics and small-room acoustics*

*Bartłomiej Chojnacki*

*bchojnacki@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Współczesne kształcenie w zakresie akustyki coraz częściej wymaga od studentów pracy ze złożonymi zbiorami danych oraz obszerną dokumentacją techniczną. W prezentacji przedstawiono podejście dydaktyczne oparte na problem-based learning, wspomagane przez sztuczną inteligencję, stosowane w nauczaniu elektroakustyki i akustyki wnętrza. Wykorzystano dedykowane modele ChatGPT, przygotowane wyłącznie na podstawie specjalistycznych materiałów dydaktycznych oraz literatury przedmiotowej. Modele te nie zastępują nauczania teoretycznego, lecz zapewniają uporządkowany i efektywny dostęp do dużych, kuratorowanych zasobów wiedzy, umożliwiając studentom koncentrację na interpretacji wyników i zrozumieniu zjawisk fizycznych.

Zaprezentowane zostaną dwa przykłady zajęć warsztatowych. W obszarze elektroakustyki omawiana jest diagnostyka głośników oparta na pomiarach nieliniowych z wykorzystaniem wcześniej przygotowanych zbiorów danych, pochodzących z symulowanych uszkodzeń przetworników. Przedstawiane są pełne procedury pomiarowe realizowane w systemie Klippel SCN w celu wyjaśnienia sposobu akwizycji danych, natomiast kompletne zestawy wyników, których pozyskanie w warunkach zajęć byłoby nierealne czasowo, udostępniane są studentom do szczegółowej analizy. W obszarze akustyki wnętrza studenci stosują metody statystyczne do projektowania adaptacji akustycznej oraz opracowują własne koncepcje ustrojów dźwiękochłonnych, korzystając z odrębnego dedykowanego modelu ChatGPT przygotowanego na podstawie materiałów kursowych i uznanych opracowań z zakresu akustyki wnętrza.

W prezentacji omówiono założenia dydaktyczne warsztatów, metody przygotowania realistycznych zbiorów danych oraz trudności obserwowane w procesie uczenia wspomagane narzędziami AI. Przedyskutowano także korzyści edukacyjne, ograniczenia oraz implikacje dla programów kształcenia w zakresie akustyki.

*Contemporary acoustics education increasingly requires students to work with complex datasets and extensive technical documentation. This presentation introduces an AI-assisted, problem-based teaching approach in electroacoustics and room acoustics using dedicated ChatGPT models trained exclusively on domain-specific instructional materials and reference literature. Rather than replacing theoretical instruction, these models provide structured and efficient access to large bodies of curated knowledge, allowing students to focus on practical interpretation, and physical understanding. Two workshop-based classes will be presented. In electroacoustics, loudspeaker*

*diagnostics based on nonlinear measurements are taught using pre-prepared datasets derived from simulated loudspeaker defects. Full measurement procedures using the Klippel SCN system are demonstrated to explain data acquisition, while complete datasets—representing measurement efforts impractical within class time—are provided to students for detailed analysis. In room acoustics, students apply statistical methods to acoustic treatment design while developing custom absorber concepts, supported by a separate dedicated ChatGPT model trained on course-specific materials and established room-acoustics texts. The presentation discusses the pedagogical design of the workshops, methods for preparing realistic datasets, and challenges observed in AI-supported learnings. Educational benefits, limitations, and implications for acoustics curricula are discussed.*

## **Obiektywna ocena jakościowa wiązek promieniowanych przez głośniki modów rozproszonych**

*Objective quality assessment of radiation patterns emitted by distributed mode loudspeakers*

*Karol Czesak, Piotr Kleczkowski*

*czesak@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Głośniki modów rozproszonych (GMR) – w przeciwieństwie do konwencjonalnych przetworników elektrodynamicznych – cechuje znaczna szerokość promieniowanej wiązki dźwięku w szerokim zakresie częstotliwości. Inną istotną ich cechą – postrzeganą dotychczas jako wada – jest silne zróżnicowanie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych pomiędzy poszczególnymi (nawet położonymi blisko siebie) punktami półsfery pomiarowej. Co więcej – każda z tych charakterystyk wykazuje (mniej lub bardziej liczną) obecność ostrych minimów lokalnych. Emisja szerokiej wiązki promieniowania przez głośnik wiąże się z licznymi odbiciami fali akustycznej od ścian pomieszczenia, jednak wciąż spory udział w kształtowaniu wrażenia barwy dźwięku mają cechy jakościowe docierającego do słuchacza dźwięku bezpośredniego. W przypadku korzystania z konwencjonalnych zestawów głośnikowych, celem uzyskania najlepszych właściwości dźwięku bezpośredniego – orientuje się zestaw osi akustyczną w stronę słuchacza, ponieważ głośniki te są optymalizowane przy takiej orientacji. W przypadku GMR – należałoby tak zorientować głośnik względem słuchacza – by wiązka doń docierająca wykazywała jak najbardziej pożądane właściwości. Stąd – konieczna jest wiedza, w którym z kierunków te najbardziej pożądane właściwości wiązki występują. W tym celu autorzy sformułowali wskaźnik jakości promieniowanej wiązki, bazujący na kombinacji liniowej wcześniej zaproponowanych dla GMR estymatorów jakościowych, takich jak: stabilność charakterystyki amplitudowej oraz miara koherencji promieniowania. Celem sformułowania nowego wskaźnika było określenie obszarów na półsferze pomiarowej, w których charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe promieniowanych wiązek osiągną jak najbardziej pożądane właściwości.

*Distributed Mode Loudspeakers (DML), as opposed to conventional electrodynamic transducers, are characterized by a notably wide radiation pattern over a broad frequency range. Another significant feature — historically regarded as a drawback — is the pronounced variability of amplitude-frequency responses across individual measurement points on the hemispherical measurement surface, including points in close spatial proximity. Furthermore, these responses typically exhibit the presence of multiple sharp local minima. The emission of a relatively broad radiation pattern is associated with numerous reflections of acoustic waves from the boundaries of the listening environment. Nevertheless, the properties of the direct sound reaching the listener remain a critical factor in the perception of timbre. In conventional loudspeaker systems, optimal direct sound characteristics are typically achieved by aligning the acoustic axis of the system with the listener's position, as loudspeakers*

*are optimized with this orientation. In the case of DML systems, however, it is necessary to orient the loudspeaker such that the radiation pattern incident upon the listener exhibits the most desirable properties. This in turn requires identification of the spatial directions in which such properties occur. To address this problem, the authors introduced the Radiated Beam Quality Index, defined as a linear combination of previously proposed qualitative estimators for DML systems, including Amplitude Characteristic Stability and the Measure of Radiation Coherence. The proposed index enables the identification of regions on the measurement hemisphere in which the amplitude-frequency responses of the emitted radiation patterns exhibit the most favorable characteristics.*

## **Założenia projektu konstrukcji urządzenia symulującego pracę dyrygenta z orkiestrą**

*Project objectives for the design of a device simulating the work of a conductor with an orchestra*

*Rafał Jacek Deleka*

*delektarafaljacek@gmail.com*

AGH w Krakowie

Przygotowanie młodego muzyka do pracy z orkiestrą jako dyrygent polega na dwóch zasadniczych etapach. Pierwszy to intelektualne poznanie partytury utworu, wraz ze wszystkimi konsekwencjami dotyczącymi elementów muzycznych i muzykologicznych. Drugi to przełożenie tej wiedzy na gest – czyli technika dyrygencka.

Ten drugi etap wymaga pracy z zespołem wykonawczym. Przeprowadzanie zajęć z orkiestrą złożoną z 40 – 80 muzyków jest zadaniem bardzo trudnym z powodów organizacyjnych oraz, przede wszystkim finansowych. Na całym świecie przyjęto rozwiązanie zastępcze, gdzie pełną orkiestrę zastępuje dwóch pianistów, realizujących utwór z partytur, w których zredukowano partię orkiestry do możliwości zagrania właśnie na dwóch fortepianach. Jest to substytut brzmienia orkiestry oraz, w większości, realizowanie głównych przebiegów muzycznych. Ten przypadek zawiera pozytywny aspekt w postaci pracy z żywym wykonawcą – pozwala na realizowanie, w pewnym zakresie, indywidualnej wizji dyrygenta.

Jednak z uwagi na ograniczenia barwowe, w stosunku do brzmienia orkiestry, a także częste różnice w topografii powstawanego dźwięku, pojawiła się idea skonstruowania kontrolera wirtualnej orkiestry (albo wirtualnego zespołu; sterowanie miało dotyczyć nie tyle efektów, co całości procesu wykonania utworu) oparty na systemie wizyjnym z predykcijną analizą gestów.

Rozmieszczenie kontrolerów będzie symulowało układ orkiestry, pozwalając trenującemu na poczucie prowadzenia żywego zespołu.

Inicjatorzy projektu zdają sobie sprawę z niszewego zasięgu docelowych odbiorców urządzenia. Dlatego też chcieliby poszerzyć badania o możliwość zastosowania urządzenia w terapii neurologicznej, pourazowej i fizjoterapii. Technologia rozpoznawania gestów połączona z biofeedbackiem dźwiękowym jak najbardziej może ułatwić rehabilitację, bo daje pacjentowi natychmiastową i zrozumiałą informację o tym, jak się porusza. Czujniki, kamery czy kontrolery śledzą ruch albo pracę mięśni, a system zamienia to np. na dźwięk – np. zmienia jego ton lub głośność. Dzięki temu pacjent od razu „słyszy”, czy wykonuje ćwiczenie dobrze i może się na bieżąco poprawić. To szczególnie pomaga osobom po udarach lub urazach kończyny górnej i dłoni (po rekonstrukcjach, przeszczepach, złamaniach), bo mózg szybciej uczy się prawidłowych ruchów, gdy dostaje jasne sygnały w czasie rzeczywistym. Dźwięk pozwala też lepiej wyczuć napięcie mięśni – czy są zbyt spięte, czy za słabe – co ułatwia odzyskanie kontroli nad ciałem.

*Preparing a young musician to work with an orchestra as a conductor involves two fundamental stages. The first is the intellectual understanding of the musical score,*

*along with all the implications regarding musical and musicological elements. The second is translating this knowledge into gestures—that is, conducting technique.*

*This second stage requires working with a performing ensemble. Conducting sessions with an orchestra composed of 40–80 musicians is a very difficult task for organizational and, above all, financial reasons. A substitute solution has been adopted worldwide, where a full orchestra is replaced by two pianists performing the piece from scores in which the orchestral part has been reduced to fit the capabilities of two pianos. This serves as a substitute for the orchestral sound and, for the most part, conveys the main musical lines. This approach has the positive aspect of working with a live performer — it allows the conductor to realize, to a certain extent, their individual vision.*

*However, due to tonal limitations compared to the sound of an orchestra, as well as frequent differences in the topography of the resulting sound, the idea arose to construct a controller for a virtual orchestra (or virtual ensemble; the control was to concern not so much effects, but rather the entire process of performing a piece) based on a video system with predictive gesture analysis.*

*The placement of the controllers will simulate the layout of an orchestra, allowing the user to experience what it's like to conduct a live ensemble.*

*The project's initiators are aware of the niche nature of the device's target audience. For this reason, they would like to expand their research to explore the device's potential applications in neurological therapy, post-traumatic therapy, and physical therapy. Gesture recognition technology combined with auditory biofeedback can certainly facilitate rehabilitation, as it provides the patient with immediate and understandable feedback on how they are moving. Sensors, cameras, and controllers track movement or muscle activity, and the system converts this into sound—for example, by changing its pitch or volume. This allows the patient to immediately "hear" whether they are performing the exercise correctly and make adjustments on the spot.*

*This is particularly helpful for people who have had strokes or injuries to the upper limb and hand (following reconstructions, transplants, or fractures), because the brain learns correct movements faster when it receives clear signals in real time. The sound also helps users better sense muscle tension—whether muscles are too tight or too weak—which facilitates regaining control over the body.*

## **Badania laboratoryjne i eksperymentalne właściwości dźwiękoizolacyjnych obudów ze ścianami transparentnymi**

*Laboratory and experimental tests of the sound-insulating properties of an enclosure with transparent walls*

*Artur Flach, Krzysztof Kosala*

*flach@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Badania dotyczą opracowania obudowy akustycznej, której ściany wykonane były z transparentnych jednorodnych paneli dźwiękoizolacyjnych. Wybór takiego materiału umożliwia nie tylko ochronę przeciwdźwiękową hałasującego urządzenia, ale także jego monitorowanie, co jest istotne, zwłaszcza gdy wykonuje ono pewien proces wymagający nadzoru. Opracowano prototyp obudowy dźwiękoizolacyjnej, której ramę stanowiły elementy wytworzone z wykorzystaniem technologii druku 3D, natomiast elementami ściennymi były panele ze szkła. Skuteczność obudowy akustycznej wyznaczono obliczając jej stratę wtrącenia dla źródeł dźwięku o sygnale stacjonarnym, imitujących hałaśliwe urządzenie w postaci głośnika i źródła wszechkierunkowego, a także dla źródeł, jakimi był kompresor oraz drukarka 3D. Ostatnie z wymienionych źródeł dźwięku generowało sygnał niestacjonarny. Badania akustyczne przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych – w komorze bezechowej, a także w pomieszczeniu, w którym warunki były zbliżone do występujących w hali przemysłowej. Badania skuteczności obudowy dźwiękoizolacyjnej wykazały podobne przebiegi charakterystyk widmowych starty wtrącenia niezależnie od użytego źródła dźwięku dla pasm 1/3 oktaowych częstotliwości powyżej 500 Hz, i znaczne rozbieżności przebiegów poniżej tej częstotliwości.

*The research concerns the development of an acoustic enclosure with walls made of transparent, homogeneous sound-insulating panels. The choice of such material provides not only noise protection for the loud device but also allows for its monitoring, which is essential, especially when it performs a process requiring supervision. A prototype of the sound-insulating enclosure was developed, featuring a frame made of elements manufactured using 3D printing technology, while glass panels were used as the wall elements. The effectiveness of the acoustic enclosure was determined by calculating its insertion loss for an omnidirectional source and a loudspeaker imitating noisy device, as well as for a compressor and a 3D printer. The last-mentioned sound source produced a non-stationary signal. The acoustic tests were conducted under laboratory conditions in an anechoic room, as well as in a room with conditions similar to those found in an industrial hall. The sound insulation effectiveness tests showed similar spectral characteristics of insertion loss regardless of the sound source used for 1/3 octave bands above 500 Hz, and significant discrepancies in the characteristics below this frequency.*

## **Wzbudzenie uderzeniowe sztabek idiofonów: analiza powtarzalności mechanizmów i zakresów parametrów uzyskanych dźwięków**

*Impact excitation of idiophone bars: an analysis of mechanism repeatability and parameter ranges of the resulting sounds*

*Michał Gurgul, Marek Pluta, Jan Jasiński*

*mgurgul@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Badanie właściwości wibroakustycznych idiofonów sztabkowych wymaga precyzyjnego i wysoce powtarzalnego źródła wzbudzenia. Gra człowieka wprowadza wariację, która komplikuje obiektywną ocenę samego instrumentu, podczas gdy wzbudniki laboratoryjne nie oddają transjentowego charakteru wzbudzania uderzeniowego, kluczowego dla tej rodziny instrumentów. Celem niniejszych badań było zaprojektowanie, skonstruowanie i analiza porównawcza trzech autorskich mechanizmów uderzeniowych pod kątem powtarzalności ich wymuszenia oraz stopnia, w jakim odwzorowują one naturalne uderzenie. Skonstruowano i przetestowano trzy układy wzbudzające, wykorzystujące różne metody napędu pałki: wahadło grawitacyjne, mechanizm inspirowany mechaniką młoteczkową fortepianu oraz siłownik elektromagnetyczny. Pomiary przeprowadzono na dedykowanym stanowisku badawczym, pozwalającym na pełną kontrolę parametrów, z wykorzystaniem zmiennych sił uderzenia oraz pałek o różnej twardości. Powtarzalność oceniono poprzez rejestrację serii uderzeń dla każdej z konfiguracji.

Zarejestrowane sygnały akustyczne przeanalizowano kluczowymi parametrami akustycznymi opisującymi barwę i dynamikę dźwięku. Wyniki zestawiono z nagraniami referencyjnymi wykonanymi przez profesjonalnego muzyka. Oceniono zakres dynamiczny każdego układu, jego powtarzalność oraz charakterystykę barwy dźwięku w celu oceny jakości wzbudników. Zidentyfikowano ograniczenia mechaniczne, takie jak podwójne uderzenia czy niepożądane tłumienie sztabki przez elementy wykonawcze, a następnie przetestowano odpowiednie rozwiązania problemów. Wynikiem tych prac jest zaproponowanie mechanizmu zapewniającego powtarzalność pomiarową oraz naturalny profil uderzenia, który może posłużyć jako narzędzie w dalszych badaniach nad akustyką i konstrukcją idiofonów.

*Investigating the vibroacoustic properties of bar idiophones requires a precise and highly repeatable excitation source. A musician's performance introduces variance that complicates the objective evaluation of the instrument itself, while continuous laboratory exciters fail to reflect the transient nature of the striking sound, which is crucial for this group of instruments. The aim of this study was to design, construct, and comparatively analyze three custom-built impact mechanisms in terms of their excitation repeatability and the degree to which they replicate a human strike. Three distinct excitation systems using different mallet drive methods were constructed and tested: a gravity pendulum, a mechanism inspired by the piano hammer action, and an electromagnetic actuator. Measurements were conducted on a dedicated test*

*stand that allowed for full parameter control, utilizing variable impact forces and mallets of varying hardness. Repeatability was assessed through recording a series of strikes for each configuration.*

*The recorded acoustic signals were analyzed utilizing key parameters determining sound timbre and dynamics. These results were compared with reference recordings performed by a professional musician. The dynamic range of each system, its repeatability and the timbral characteristics were used to evaluate which mechanism is the most dependable and representative. Mechanical limitations, such as undesirable dampening of the bar by the actuating elements or double striking, were identified and solutions were tested. The result of this work is the selection of a mechanism that provides measurement stability and a natural impact profile, which will serve as a reliable tool in further research on the construction and acoustics of idiophones.*

**Klasyfikacja stochastycznych odpowiedzi dynamicznych układu wzbudzanego losową serią impulsów z wykorzystaniem sieci rekurencyjnych: o długiej pamięci krótkotrwałej (LSTM), dwukierunkowych sieci o długiej pamięci krótkotrwałej (BiLSTM) oraz bramkowanych jednostek rekurencyjnych (GRU)**

*Stochastic response classification of dynamically excited systems under random impulse series using recurrent neural networks: LSTM, BiLSTM, and GRU*

*Cherif Hamrani, Agnieszka Ozga*

*hamrani@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

W pracy przedstawiono analizę drgań stochastycznych jednowymiarowego układu dynamicznego, którego drgania wymuszane są przez losowe serie impulsów. Przeprowadzono symulacje procesu drgań, a następnie na ich podstawie wykonano analizę wykorzystującą momenty zwykłe. Losowość wzbudzenia opisana jest przez dwie zmienne losowe: czasy między kolejnymi impulsami  $\tau_i$ , przyjęte jako niezależne zmienne losowe o rozkładzie wykładniczym, oraz wielkości impulsów  $\eta_i$ , modelowane jako dyskretna zmienna losowa o zadanych momentach. Badania symulacyjne obejmowały kilka przypadków o identycznych momentach stochastycznych, ale z różnymi rozkładami wielkości impulsów oraz różnymi intensywnościami impulsów  $\lambda$ . Uzyskane zbiory danych posłużyły do oceny skuteczności algorytmów uczenia maszynowego opartych na sieciach rekurencyjnych: sieci o długiej pamięci krótkotrwałej (*Long Short-Term Memory*, LSTM), dwukierunkowych sieci o długiej pamięci krótkotrwałej (*Bidirectional Long Short-Term Memory*, BiLSTM) oraz bramkowanych jednostek rekurencyjnych (*Gated Recurrent Unit*, GRU). Uzyskane wyniki dostarczają wglądu w skuteczność reprezentacji losowych szeregów czasowych opartych na momentach, a także stanowią praktyczne wskazówki przy projektowaniu przyszłych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem stochastycznych układów dynamicznych wzbudzanych impulsowo.

*This paper addresses stochastic vibrations of a one-dimensional dynamical system subjected to impulsive excitation. A mathematical model is employed to derive a moment-based representation of the system response, with raw stochastic moments estimated from simulated realizations of the vibration process. The randomness of the excitation is governed by two random variables: the inter-arrival times  $\tau_i$ , assumed independent and exponentially distributed with intensity  $\lambda$ , and the impulse amplitudes  $\eta_i$ , modelled as a discrete random variable with prescribed moments. A comprehensive simulation study is conducted considering multiple scenarios that share identical selected moments while differing in the underlying value of impulses and impulse intensities  $\lambda$ . The resulting datasets are used to formulate a multiclass classification problem and to assess the performance of various machine-learning algorithms based on recurrent neural networks: Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM), and Gated*

Recurrent Unit (GRU). *The obtained results provide insight into the effectiveness of moment-based representations of random time series and offer practical guidelines for the design of future experimental studies involving impulsively excited stochastic dynamical systems.*

Oplata za publikację została sfinansowana ze środków projektu badawczego AGH nr 10000 501.00 130000, dofinansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.

## **Korekta akustyczna wewnątrz na przykładzie wybranych sal koncertowych**

*Acoustic correction of interiors based on selected concert halls*

*Tadeusz Kamisinski*

*kamisins@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Praca dotyczy zagadnień korekty akustycznej wewnątrz na przykładzie wybranych sal koncertowych i teatralnych w Krakowie. Szczególną uwagę poświęcono problemom związanym z pierwszymi odbiciami dźwięku, stanowiącymi jedną z głównych przyczyn obniżenia jakości akustycznej obiektów muzycznych. Przedstawiono wyniki badań oraz realizacje Zespołu Laboratorium Akustyki Technicznej AGH, obejmujące projektowanie i wdrażanie nowoczesnych ustrojów akustycznych. Omówiono zastosowanie struktur rozpraszających i refleksyjnych, w tym paneli dyfuzyjnych, okładzin szczelinowych oraz nadscenicznych paneli refleksyjnych, analizując ich wpływ na rozkład parametrów akustycznych. Zaprezentowano wybrane realizacje, m.in. modernizację sali Filharmonii Krakowskiej, Teatru KTO oraz Teatru Variete, wskazując na rolę symulacji numerycznych i badań laboratoryjnych w procesie optymalizacji rozwiązań projektowych. Przedstawiono również metody projektowania ustrojów rozpraszających z wykorzystaniem algorytmów optymalizacyjnych oraz ich charakterystyki częstotliwościowe. Wykazano, że kluczowe znaczenie dla jakości akustycznej wewnątrz ma właściwe kształtowanie powierzchni odbijających i rozpraszających oraz kontrola czasu pogłosu, determinującego funkcję obiektu. Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań materiałowych i geometrycznych, w tym struktur optymalizowanych i metamateriałów akustycznych, umożliwi skuteczną kształtowanie warunków akustycznych w obiektach o wysokich wymaganiach użytkowych.

*The work addresses issues of acoustic correction of interiors, based on selected concert and theatre halls in Kraków. Particular attention is given to problems related to early sound reflections, which constitute one of the main causes of reduced acoustic quality in musical venues. The results of research and implementations carried out by the AGH Technical Acoustics Laboratory team are presented, including the design and application of modern acoustic treatments. The use of diffusive and reflective structures is discussed, including diffusion panels, slotted claddings, and overhead stage reflectors, with an analysis of their impact on the distribution of acoustic parameters. Selected projects are presented, such as the modernization of the Kraków Philharmonic Hall, KTO Theatre, and Variete Theatre, highlighting the role of numerical simulations and laboratory studies in optimizing design solutions. Methods for designing diffusive structures using optimization algorithms are also described, along with their frequency characteristics. It is demonstrated that the proper shaping of reflective and diffusive surfaces, as well as control of reverberation time which determines the function of a venue are of key importance for acoustic quality. The application of modern material and geometric solutions, including optimized struc-*

*tures and acoustic metamaterials, enables effective shaping of acoustic conditions in facilities with high performance requirements.*

## **Analiza zmienności parametrów sygnałów akustycznych zimującej rodziny pszczelej**

*Analysis of the variability of acoustic signal parameters in a wintering honeybee colony*

*Piotr Książek, Urszula Libal*

*piotr.ksiazek@pwr.edu.pl*

Politechnika Wrocławska

Cykl roczny życia rodziny pszczelej składa się z wielu etapów, podczas których pszczoły wykonują zadania niezbędne do przetrwania kolektywnego superorganizmu. Istotnym elementem tego cyklu jest zimowla, trwająca zazwyczaj od końca listopada do początku lutego. W tym okresie rodzina, zawiązana w kłęb zimowy, jest szczególnie wrażliwa na niekorzystne czynniki środowiskowe. Niniejsza praca opisuje zmienność sygnałów dźwiękowych emitowanych przez zimującą rodzinę pszczełą. W tym celu przeprowadzono badanie polegające na ciągłym monitoringu akustycznym pszczół. Opracowano metodę akwizycji danych z wykorzystaniem mikrofonów umieszczonych na zewnątrz ula oraz wewnątrz jego wylotka. Dokonano ekstrakcji cech sygnału oraz analizy widmowej dźwięków emitowanych przez kłęb. Wykazano zależności między zmiennością warunków środowiskowych a częstotliwością podstawową dźwięku wewnątrz ula, a także zademonstrowano cykliczność parametrów energetycznych i widmowych sygnałów. Prezentowane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania rejestracji dźwięku w systemach monitoringu stanu rodzin pszczelich w okresie zimowym.

*The annual life cycle of a honey bee colony consists of many stages during which bees perform tasks essential for the survival of the collective superorganism. A critical element of this cycle is overwintering, typically lasting from late November to early February. During this period, the colony formed into a winter cluster is particularly sensitive to adverse environmental factors. This paper describes the variability of acoustic signals emitted by a wintering honeybee colony. To this end, a study involving continuous acoustic monitoring of the bees was conducted. A data acquisition method was developed using microphones placed both outside the hive and inside its entrance. Signal feature extraction and spectral analysis of the sounds emitted by the cluster were performed. The results demonstrate correlations between environmental variability and the fundamental frequency of the sound inside the hive, while also illustrating the cyclical nature of the signals' energy and spectral parameters. The findings confirm the feasibility of using sound recording in monitoring systems to assess the state of honeybee colonies during the winter period.*

## **Wpływ wybranych zjawisk akustycznych na dokładność lokalizacji źródła dźwięku w środowiskach wirtualnych**

*The impact of selected acoustic phenomena on sound source localization accuracy in virtual environments*

*Marta Kucejko, Marek Pluta, Jan Jasiński*

*martakucejko@gmail.com*

AGH w Krakowie

Środowiska wirtualne oferują symulację różnorodnych zjawisk związanych z propagacją i percepcją fali akustycznej, jednak dobór tych zjawisk oraz ich rzeczywisty wpływ na reakcje użytkownika pozostają niejednoznaczne. Celem referatu jest przedstawienie metody badawczej oraz wyników eksperymentu, w którym uczestnicy wykonywali zadanie polegające na precyzyjnej lokalizacji źródeł dźwięku w wirtualnej rzeczywistości. W badaniu wykorzystano różne metody przestrzennego przetwarzania dźwięku, obejmujące m.in. klasyczne panoramowanie (panning), funkcje HRTF, a także dodatkowe przekształcenia sygnału, takie jak filtracja i pogłos o zróżnicowanych parametrach. Celem eksperymentu była weryfikacja, czy i w jakim stopniu zastosowane techniki wpływają na efektywność wykonania zadania w środowisku wirtualnym przez użytkowników. Analiza zebranych danych koncentruje się na ocenie precyzji lokalizacji źródeł dźwięku, wyrażonej poprzez błędy kątowe, co pozwala określić wpływ poszczególnych metod na zdolność orientacji przestrzennej w środowisku VR.

*Virtual environments enable the simulation of various phenomena related to the propagation and perception of acoustic waves; however, the criteria for selecting these phenomena and their actual impact on user performance remain unclear. This work presents the research method and the results of an experiment in which participants performed a task involving the precise localization of sound sources in virtual reality. The study employed various spatial audio processing methods, including standard panning, HRTF functions, as well as additional signal transformations such as filtering and reverberation with varying parameters. The purpose of the experiment was to determine whether, and to what extent, the applied techniques influenced task performance in a virtual environment. The analysis of the collected data focuses on evaluating the accuracy of sound source localization using angular error, making it possible to assess the impact of individual methods on spatial orientation in a VR environment.*

## **Modelowanie jakości akustycznej pomieszczenia w środowisku przemysłowym: studium przypadku**

*Modeling of the acoustic quality of a room in an industrial environment: a case study*

*Krzysztof Ledwoń, Waldemar Paszkowski*

*krzysztof.ledwon@polsl.pl*

Politechnika Śląska

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w zakresie modelowania jakości akustycznej pomieszczenia przemysłowego. Ocena hałasu w pomieszczeniach przemysłowych opiera się na pomiarach poziomu ciśnienia akustycznego oraz odniesieniu uzyskanych wyników do wartości dopuszczalnych. Postępowanie to jest uzasadnione z punktu widzenia oszacowania zagrożenia hałasem, nie pozwala jednak określić zmienności pola akustycznego, czy też wyznaczyć udział własności akustycznych pomieszczenia. Opierając się na wynikach prac w zakresie oceny jakości akustycznej pomieszczeń badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody wskaźnikowej, łączącej informacje o emisji hałasu źródła technologicznego z własnościami akustycznymi pomieszczenia.

W pierwszym etapie wyznaczono czas pogłosu metodą odpowiedzi impulsowej zgodnie. Wzbudzenie pola akustycznego realizowano za pomocą szerokopasmowego źródła impulsowego w postaci źródła pirotechnicznego, a rejestrację sygnałów prowadzono przy użyciu rejestratora dźwięku.

W drugim etapie określono poziom mocy akustycznej tokarki TUB32. Poziomą moc akustyczną tokarki wyznaczono na podstawie pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego. Pomiary przeprowadzono dla dwóch wariantów pracy tokarki różniących się prędkością obrotową wrzeciona.

Na podstawie pozyskanych informacji wyznaczony został globalny wskaźnik klimatu akustycznego pomieszczenia, która uwzględnia jego własności akustyczne oraz emisję źródła. Zastosowanie metody wskaźnikowej w modelowaniu jakości akustycznej pomieszczeń pozwala na porównanie wartości nie tylko wskaźników cząstkowych, ale również analizować wariantowo pracę maszyny.

Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych w obszarze modelowania jakości akustycznej pomieszczeń wskazują na zasadność powiązania parametrów opisujących zanik energii akustycznej w pomieszczeniu oraz emisyjności źródła dźwięku.

*The article presents the results of experimental research on modeling the acoustic quality of an industrial room. The issue addressed is part of broader research aimed at developing a model for assessing noise annoyance in an industrial environment. Standard noise assessment in industrial rooms is based on sound pressure level measurements and comparison of the obtained results with permissible values. Although this procedure is justified from the point of view of noise hazard assessment, it does not allow the variability of the acoustic field to be determined or the contribution of the room's acoustic properties to be identified.*

*Based on previous work on the assessment of room acoustic quality, the study*

was carried out using an index-based method combining information on the noise emission of the technological source with the acoustic properties of the room. The research was conducted in two stages in a machining laboratory representing a typical industrial environment with a diffuse acoustic field.

In the first stage, reverberation time was determined using the impulse response method in accordance with ISO 3382-2. The acoustic field was excited using a broadband pyrotechnic impulsive source, and the signals were recorded using a sound recorder. Six independent source-receiver configurations were adopted, and the impulse responses were analyzed in broadband form as well as in 1/1- and 1/3-octave bands.  $RT_{20}$  and  $RT_{30}$  were determined using Schroeder backward integration and linear regression.

In the second stage, the sound power level of the TUB32 lathe was determined in accordance with PN-EN ISO 3746 on the basis of sound pressure level measurements performed at seven points. The measurements were carried out for two operating variants differing in spindle speed, while maintaining the same depth of cut and feed rate. Based on the acquired information, the global acoustic climate index was determined, taking into account the acoustic properties of the room and source emission. The results indicate the validity of linking parameters describing the decay of acoustic energy in the room with the emission of the sound source.

Publikacja współfinansowana z projektu nr FESL.10.25-IZ.01-07E7/23

## **Subpozycyjny charakter tonu krtaniowego w procesie akustyczno-fizjologicznego przetwarzania sygnału mowy i śpiewu**

*The subpositional character of the laryngeal tone in the process of acoustic-physiological speech and singing signal processing*

Zdzisław Madej

zmadej@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Niniejsze wystąpienie koncentruje się na analizie subpozycyjnego charakteru tonu krtaniowego w kontekście złożonych mechanizmów jego akustyczno-fizjologicznego przetwarzania. Głównym celem rozważań jest ukazanie, że pierwotny sygnał generowany w krtani nie stanowi jedynie statycznego produktu drgań fałdów głosowych, lecz jest dynamicznym efektem interakcji aerodynamicznej, silnie uzależnionym od warunków panujących w przestrzeni podgłośniowej oraz wartości ciśnienia  $P_{sub}$ . W pracy poddano szczegółowej analizie proces, w którym konfiguracja krtani oraz parametry przepływu powietrza determinują wstępną strukturę akustyczną dźwięku, podlegającą następnie wielopoziomowej modyfikacji w trakcie pasażu przez trakt głosowy. Autor zwraca uwagę na zjawisko sprzężenia źródła z filtrem, wykazując, że fizjologiczne uwarunkowania położenia krtani mają bezpośrednie przełożenie na ostateczną barwę, stabilność oraz wydolność energetyczną głosu. Poprzez integrację wiedzy z zakresu foniatrii, akustyki fizycznej oraz logopedii, referat dostarcza nowych danych na temat holistycznego funkcjonowania aparatu fonacyjnego jako zintegrowanego układu aero-dynamiczno-akustycznego. Przedstawione wnioski mają istotne znaczenie nie tylko dla rozwoju teoretycznych modeli mowy, ale również dla praktyki klinicznej i pedagogiki głosu, wskazując na kluczową rolę komponenty aerodynamicznej w obiektywnej ocenie jakości sygnału mowy.

*This presentation focuses on the analysis of the subpositional nature of the laryngeal tone within the context of complex mechanisms of its acoustic-physiological processing. The primary objective of the study is to demonstrate that the primary signal generated in the larynx is not merely a static product of vocal fold vibrations, but rather a dynamic result of aerodynamic interaction, heavily dependent on the conditions within the subglottic space and the values of subglottal pressure ( $P_{sub}$ ). The paper provides a detailed analysis of the process in which laryngeal configuration and airflow parameters determine the initial acoustic structure of the sound, which subsequently undergoes multi-level modification during its passage through the vocal tract. The author highlights the phenomenon of source-filter coupling, demonstrating that the physiological conditions of laryngeal positioning have a direct impact on the final timbre, stability, and energy efficiency of the voice. By integrating knowledge from phoniatrics, physical acoustics, and speech-language pathology, the paper provides new data on the holistic functioning of the phonatory apparatus as an integrated aero-acoustic system. The presented findings are significant not only for the development of theoretical speech models but also for clinical practice and voice*

*pedagogy, emphasizing the crucial role of the aerodynamic component in the objective assessment of speech signal quality.*

## **Dynamic mechanical characterization of composite materials with varied filler mass ratios and their application in electric guitar manufacturing**

*Dynamic mechanical characterization of composite materials with varied filler mass ratios and their application in electric guitar manufacturing*

*Paweł Malecki\*\*,\*\*, Igor Dąbrowski\*\*, Rafał Perz\*\*,\*\*, Marek Matyjewski\**

*pawel.malecki@rufguitars.com*

*\*Warsaw University of Technology; \*\*RUF Guitars, Sieć Badawcza Rafał Perz*

-

*This study extends prior research on the dynamic mechanical characterization of carbon fibre epoxy laminates with various fillers as potential alternatives to traditional tonewoods in musical instrument manufacturing. The previous investigation confirmed that incorporating different fillers - microballoons, aerosil, graphite powder, and aluminium powder - into composite laminates measurably influences their dynamic properties, with certain compositions achieving higher storage modulus and lower loss factor than natural woods across the 100–2000 Hz frequency range. Building upon these findings, the present work systematically examines the effect of filler mass ratio variations on the dynamic characteristics of composite samples, aiming to identify compositions applicable for musical instrument production. Rectangular composite specimens with varied filler proportions were fabricated and tested using a modal shaker and accelerometer setup, following the resonance-curve method in accordance with ISO 6721. Storage modulus, loss modulus, and loss factor were evaluated across the 100–2000 Hz range to assess the sensitivity of dynamic response to filler content. Based on the sample-level results, a one-piece electric guitar was manufactured from the selected composite material. A geometrically identical instrument was CNC-machined from mahogany to serve as a reference. Both guitars were tested in an unstrung, bare-body configuration using single-point excitation with multiple accelerometer measurement positions across the instrument body. Comparative modal analysis revealed measurable differences in the dynamic behaviour between the composite and mahogany instruments, demonstrating the potential of translating material-level findings to full-scale instrument production. The results indicate that engineered composites represent a promising and reproducible alternative to natural tonewoods in musical instruments manufacturing.*

## **Transmisja drgań w zespole sprzężonych komór pogłosowych: eksperymentalna ocena wybranych wariantów wibroizolacji źródła**

*Structural vibration transmission in coupled reverberation chambers: experimental evaluation of selected source-isolation configurations*

*Dominik Mleczo, Paweł Bydłosz*

*dmleczo@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

W pracy przeanalizowano zjawisko przenoszenia drgań wywoływanych pracą źródła dźwięku na konstrukcję sprzężonych komór pogłosowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu wibroizolacji zastosowanej bezpośrednio pod źródłem na poziom drgań rejestrowanych w komorze odbiorczej. Pomiary wykonano w trzech osiach z użyciem czujników piezoelektrycznych, a opracowanie wyników oparto na wartościach skutecznych RMS oraz analizie widmowej FFT. Wymuszenie realizowano sygnałami sinusoidalnymi w wybranych częstotliwościach oraz szumem różowym, co umożliwiło ocenę odpowiedzi układu zarówno w warunkach pobudzenia wąskopasmowego, jak i szerokopasmowego. Porównano konfigurację referencyjną (bez izolacji) z kilkoma wariantami wibroizolacji, obejmującymi elastyczną matę gumową oraz układy warstwowe z elementem sprężystym i dociążeniem płytą stalową, w tym wersję o zwiększonej stabilności podparcia. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowane rozwiązania nie zapewniły jednoznacznej i powtarzalnej redukcji drgań w komorze odbiorczej, a w części przypadków obserwowano lokalne wzmocnienia odpowiedzi, szczególnie w zakresie częstotliwości średnich. Najwyższą podatność konstrukcji na wzbudzenie zidentyfikowano w paśmie około 350–550 Hz, z wyraźnie zaznaczonym udziałem jednej z częstotliwości dominujących. Otrzymane rezultaty sugerują istotny udział alternatywnych dróg transmisji drgań w układzie oraz potrzebę dalszej diagnostyki, ukierunkowanej na identyfikację elementów odpowiedzialnych za przenoszenie energii drganiowej i określenie postaci drgań własnych konstrukcji.

*The study investigates the transmission of vibrations induced by a sound source to the structure of coupled reverberation chambers, with particular emphasis on how vibration isolation applied directly under the source affects vibration levels recorded in the receiving chamber. Measurements were carried out in three axes using piezoelectric transducers, and the results were processed using RMS values and FFT-based spectral analysis. Excitation was provided by sinusoidal signals at selected frequencies as well as by pink noise, enabling the assessment of the system response under both narrowband and broadband conditions. A reference configuration (without isolation) was compared with several isolation variants, including a compliant rubber mat and layered arrangements combining a resilient element with additional mass in the form of a steel plate, including a version with increased support stability. The results indicate that the tested solutions did not provide a clear and repeatable reduction of vibrations in the receiving chamber; in some cases, local amplification of the response was observed, particularly in the mid-frequency range. The highest structural*

*susceptibility to excitation was identified in a band of approximately 350–550 Hz, with a distinct contribution of one dominant frequency component. The findings suggest a significant role of alternative vibration transmission paths within the system and highlight the need for further diagnostics aimed at identifying the elements responsible for transferring vibrational energy and determining the structural mode shapes.*

## Niepewności pomiarowe w akustyce budowlanej i środowiskowej

*Measurement uncertainties in building and environmental acoustics*

*Artur Nowosiwiat*

*artur.nowoswiat@polsl.pl*

Politechnika Śląska

Niepewność pomiarowa stanowi nieodłączną cechę każdego pomiaru fizycznego i nie może być traktowana wyłącznie jako niedoskonałość aparatury lub błąd procedury badawczej. W akustyce jej źródła są szczególnie zróżnicowane i obejmują między innymi właściwości zastosowanych czujników, metody kalibracji, warunki środowiskowe, zmienność badanego pola akustycznego oraz subiektywne decyzje podejmowane na etapie analizy danych. Poza klasycznymi metodami szacowania niepewności w niniejszej pracy zwrócono również uwagę na metody nieklasyczne, które obejmują podejścia numeryczne, statystyczne oraz probabilistyczne. Metody Monte Carlo, techniki bootstrapowe, analiza bayesowska, logika rozmyta, metody liczb perturbacyjnych, algebra decybelowa, czy podejścia oparte na teorii przedziałów umożliwiają bardziej elastyczny i realistyczny opis niepewności w sytuacjach, w których założenia klasyczne nie są spełnione lub prowadzą do wyników trudnych do interpretacji. Ich zastosowanie pozwala na uwzględnienie złożonych zależności między wielkościami wejściowymi oraz na lepsze odwzorowanie rzeczywistego charakteru procesów pomiarowych w akustyce. W pracy przedstawiono niepewności dla miar decybelowych zarówno w ujęciu klasycznym jak i nie klasycznym. Całość zobrazowano przykładami z pomiarów hałasu środowiskowego, pomiaru pogłosowego współczynnika pochłaniania dźwięku oraz izolacyjności akustycznej przegród budowlanych.

*Measurement uncertainty is an inherent feature of every physical measurement and cannot be treated solely as equipment imperfection or testing procedure error. In acoustics, its sources are particularly diverse, encompassing the properties of the sensors used, calibration methods, environmental conditions, the variability of the investigated acoustic field, and subjective decisions made during the data analysis stage. Beyond classical uncertainty estimation methods, this paper also highlights non-classical methods, which include numerical, statistical, and probabilistic approaches. Monte Carlo methods, bootstrap techniques, Bayesian analysis, fuzzy logic, perturbation number methods, decibel algebra, and interval theory approaches allow for a more flexible and realistic description of uncertainty in situations where classical assumptions are not met or lead to results that are difficult to interpret. Their application enables the consideration of complex dependencies between input quantities and a better representation of the true nature of measurement processes in acoustics. This paper presents uncertainties for decibel measures in both classical and non-classical terms. The study is illustrated with examples from environmental noise measurements, reverberant sound absorption coefficient measurements, and the airborne sound insulation of building partitions.*

## Wibrometria laserowa 3D płyt skrzypiec – pomiary bazowe

*3D laser vibrometry of violin plates – baseline measurements*

*Marek Pluta, Roman Trojanowski*

*pluta@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Właściwości dźwięku skrzypiec zależą w głównej mierze od charakteru drgań ich wierzchniej i spodniej płyty rezonansowej. Badania tych drgań mają długą historię, w której tradycyjne metody wykorzystujące figury Chladniego zastąpione zostały metodami optycznymi. Zastosowanie metod bezkontaktowych jest uzasadnione niewielką masą płyt. Typowa masa płyty wierzchniej w skrzypcach osiąga 60–70 g, zaś płyty spodniej 100–110 g. Płyty charakteryzują się określoną krzywizną oraz zmiennym profilem grubości, co w połączeniu ze sposobem w jaki są one wzbudzane do drgań podczas gry na instrumencie sprawia, że obserwacja ich drgań w jednej osi nie wystarcza do uzyskania pełnego obrazu zachowania się instrumentu.

Referat przedstawia rezultaty pomiarów drgań płyt skrzypiec zrealizowanych techniką skanującej wibrometrii laserowej 3D. W podobnych badaniach opisywanych w literaturze do wzbudzenia drgań płyt wykorzystywano różne mechanizmy. Stosowano grę smyczkiem, zarówno tradycyjnym, jak i kołowym, wzorowanym na rozwiązaniu znanym z liry korbowej i violi organista. W tym wypadku wzbudzenie następowało poprzez strunę, miało więc charakter harmoniczny. W innych badaniach stosowano wzbudzenie impulsowe w postaci młotka modalnego uderzającego w podstawek. W badaniach przedstawionych w niniejszym referacie do wzbudzenia płyt wykorzystano głośnik. Zaletą tego rozwiązania w porównaniu do wymienionych technik jest brak obecności mechanizmu umieszczonego nad instrumentem i w konsekwencji pozostawienie swobodnego dostępu wibrometru do całej powierzchni badanych płyt.

Przedstawione w referacie wyniki stanowią dane bazowe dla dalszych prac, w których zastosowane zostaną mechanizmy wzbudzające drgania wybranych elementów instrumentu w jednej oraz w kilku osiach. Badania te dadzą lepszy wgląd w złożony proces powstawania dźwięku skrzypiec przy różnych technikach gry.

*The sonic properties of a violin depend primarily on the nature of the vibrations of its top and back plates. The study of these vibrations has a long history, with traditional methods using Chladni figures being replaced by optical methods. The use of non-contact methods is justified by the low mass of the soundboards. The typical mass of a violin top plate reaches 60–70 g, while the back plate weighs 100–110 g. The boards are characterized by a specific curvature and variable thickness profile, which, combined with the way they are excited to vibrate during playing, means that observing their vibrations in a single axis is insufficient to obtain a complete picture of the instrument's behaviour.*

*This paper presents the results of vibration measurements of violin plates carried out using 3D scanning laser vibrometer. In similar studies described in the literature, various mechanisms were used to induce vibrations in the soundboards. Bows were*

*used, both traditional and circular, modelled on the bow used in the hurdy-gurdy and viola organista. In this case, excitation occurred through the string, and was therefore harmonic in nature. Other studies have used impulsive excitation in the form of a modal hammer striking the bridge. In the research presented in this paper, a loudspeaker was used to excite the plates. The advantage of this solution compared to the aforementioned techniques is the absence of a mechanism placed above the instrument, thus allowing the vibrometer free access to the entire surface of the studied plates.*

*The results presented in this paper constitute the baseline data for further work, which will utilize mechanisms that excite vibrations of selected instrument elements in single and multi-axis. This research will provide greater insight into the complex process of violin sound production in cases of various playing techniques.*

## **Kształtowanie kierunkowości odbicia dźwięku przez panele refleksyjne o przestrzennie modyfikowanej impedancji akustycznej**

*Shaping the directivity of sound reflection using reflective panels with spatially modulated acoustic impedance*

*Jarosław Rubacha*

*jrubacha@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

W artykule przedstawiono możliwości kształtowania charakterystyk kierunkowości odbicia dźwięku od paneli refleksyjnych zbudowanych z elementarnych komórek o zróżnicowanej impedancji akustycznej. Badania przeprowadzono w oparciu o opracowane modele numeryczne, które umożliwiły ocenę wpływu rozkładu impedancji na powierzchni panelu na kierunek oraz rozkład energii fali odbitej. Wykazano, że odpowiednia modyfikacja impedancji poszczególnych komórek pozwala na sterowanie kątem odbicia oraz kształtowanie charakterystyki kierunkowej. Rozwiązanie to znajduje potencjalne zastosowanie w akustyce architektonicznej, w szczególności w kształtowaniu pola akustycznego w pomieszczeniach.

*The paper presents the possibilities of shaping the directivity characteristics of sound reflection using reflective panels composed of elementary cells with varying acoustic impedance. The study is based on developed numerical models, which enabled the assessment of the influence of the impedance distribution across the panel surface on the direction and energy distribution of the reflected wave. It is demonstrated that appropriate modification of the impedance of individual cells allows for controlling the reflection angle as well as shaping the directivity pattern. The proposed solution shows potential applications in architectural acoustics, particularly in the design and control of sound fields in enclosed spaces.*

## **Pomiary drgań płyty obciążonej jednostronnie wodą – porównanie stanowisk**

*Vibration measurements of a plate with water on one side – a comparison of test setups*

*Roman Trojanowski, Jerzy Wiciak*

*roman.cz.trojanowski@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Prezentowana praca przedstawia wstępne wyniki porównania dwóch stanowisk do pomiarów układów płytowych obciążonych jednostronnie wodą. Starsze stanowisko o wymiarach 345x1000x500 mm pozwala na montaż pojedynczej płyty kołowej o średnicy 150 mm, nowe stanowisko o wymiarach 480x1080x540 mm pozwala na montaż płyty kołowej, lub zespołu płyt o średnicy ok. 226 mm.

Na potrzeby wstępnych badań w obu stanowiskach zamontowano pojedyncze płyty o odpowiednich średnicach. W przypadku starszego stanowiska była to stalowa płyta o grubości 0,4 mm. W przypadku nowego stanowiska materiałem płyty było aluminium, a jej grubość wynosiła 1 mm. Do pomiarów drgań płyt wykorzystano 1 głowicę skanującą QTec XTRA firmy Polytec. Ciśnienie akustyczne w wodzie mierzono przy pomocy hydrofonu Brüel & Kjær 8103. Jako wymuszenie w przypadku starszego stanowiska wykorzystano aktuatory piezoelektryczne, w przypadku nowego wzbudnik drgań THE MODAL SHOP 2004E. W wynikach zaprezentowano zmierzone wartości dla drgań płyty oraz ciśnień akustycznych wody wraz z wizualizacjami.

*This work presents preliminary results of a comparison between two test benches for measuring plate structures subjected to one sided water load. The older test bench, measuring 345x1000x500 mm, allows for the installation of a single circular plate with a diameter of 150 mm, while the new test stand, measuring 480x1080x540 mm, allows for the installation of either a single circular plate or a set of plates with a diameter of approximately 226 mm.*

*For the purposes of these preliminary tests, single plates of appropriate diameters were mounted in both test stands. In the case of the older test stand, this was a 0.4 mm thick steel plate. In the case of the new test stand, the plate was made of aluminum and was 1 mm thick. A single Polytec QTec XTRA scanning head was used to measure plate vibrations. Acoustic pressure in the water was measured using a Brüel & Kjær 8103 hydrophone. Piezoelectric actuators were used as the excitation source for the older test stand, while a THE MODAL SHOP 2004E vibration exciter was used for the new one. The results present the measured values for plate vibrations and water sound pressure levels, along with visualizations.*

## **Analiza metod kształtowania i transmisji dźwięku w kierunkowych głośnikach parametrycznych (PAL)**

*Analysis of sound shaping and transmission methods in directional parametric array loudspeakers (PAL)*

*Filip Węgrzyn*

*filipwegryzn@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Głośniki parametryczne (ang. *Parametric Array Loudspeakers*, PAL) stanowią typ źródeł dźwięku, pozwalających na emisję silnie kierunkowych wiązek akustycznych w zakresie słyszalnym. Ich działanie opiera się na emisji sygnału o wysokiej częstotliwości (ultradźwiękowego), modulowanego tak, aby w wyniku demodulacji nieliniowej w powietrzu powstawał dźwięk słyszalny. W efekcie stworzona zostaje wysoce kierunkowa wiązka fal akustycznych, umożliwiającą precyzyjną emisję dźwięku.

W ramach badań skonstruowane zostały dwa głośniki parametryczne złożone z przetworników ultradźwiękowych rozmieszczonych w dwóch konfiguracjach, pozwalających na uzyskanie różnych kształtów wiązki dźwięku. Po skonstruowaniu głośników przeprowadzono pomiary ich charakterystyk częstotliwościowych oraz kierunkowości, w zależności od zastosowanych przetworników oraz wykorzystanych metod modulacji o różnych głębokościach. Zbadano także odbicie wiązki od silnie refleksyjnych powierzchni.

Do pomiarów wykorzystano filtr mikrofonowy stworzony w technologii druku 3D, filtrujący zakłócenia pochodzące od ultradźwięków generowanych przez głośnik. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie optymalnych parametrów kształtu macierzy, typu przetwornika oraz metody modulacji i jej głębokości.

*Parametric Array Loudspeakers (PAL) are a type of sound source capable of emitting highly directional acoustic beams within the audible frequency range. Their functioning is based on the emission of a high-frequency (ultrasonic) signal that is modulated in such a way that, as a result of nonlinear demodulation in air, audible sound is generated. This process creates a highly directional beam of acoustic waves, enabling precise sound emission.*

*As part of this study, two parametric array loudspeakers were constructed using ultrasonic transducers arranged in two different configurations, allowing for the generation of acoustic beams with varying shapes. After construction, measurements of their frequency responses and directivity patterns were carried out, depending on the type of transducers used as well as the applied modulation methods with different modulation depths. The reflection of the acoustic beam from highly reflective surfaces was also investigated.*

*For the measurements, a microphone filter manufactured using 3D printing technology was created, designed to suppress spurious sounds originating from ultrasonic signals generated by the loudspeakers. The obtained results made it possible to determine the optimal parameters of array geometry, transducer type, as well as the modulation method and its depth.*

## **Akustyczne przetwarzanie tonu krtaniowego u śpiewaków klasycznych**

*Acoustic processing of the laryngeal tone in classical singing*

*Anna Wójcik*

*aniawojcik@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Powstawanie dźwięków w ludzkim organizmie, traktowanym jako instrument muzyczny jest złożonym procesem. Precyzyjne współdziałanie mięśni prowadzi do drgań fałdów głosowych w głośni, w wyniku czego generowany jest dźwięk, który następnie przetwarzany jest w poszczególnych piętrach traktu głosowego. Zagadnienie emisji głosu jest kluczowe dla śpiewaków klasycznych, których aparat głosowy stanowi podstawowe narzędzie pracy. Właściwa technika tworzenia dźwięków pozwala na pełne wykorzystanie potencjału oraz skuteczne zapobieganie powstawaniu jego stanów chorobowych. Istotnym elementem warunkującym właściwy dobór repertuaru dla danego śpiewaka klasycznego jest świadomość tzw. średnicy głosu, co umożliwia swobodne operowanie głosem bez nadmiernego obciążania krtani w danych zakresach skali głosowej. W pracy przedstawione zostaną metody akustycznego przetwarzania tonu krtaniowego, pozwalające na obiektywną ocenę głosu emitowanego przez śpiewaka klasycznego. Szczególna uwaga zostanie poświęcona różnicowaniu szczególnych rejestrów (pięter) w obrębie skali głosu.

*Sound production in the human body, treated as a musical instrument, is a complex process. Precise muscular coordination causes the vocal folds in the glottis to vibrate, generating sound that is then processed by the various levels of the vocal tract. Voice production is crucial for classical singers, for whom the vocal apparatus is the primary professional tool. Proper technique allows for the full utilization of their potential and the effective prevention of pathological conditions. A key element in selecting the right repertoire is awareness of the singer's middle range (the so-called vocal diameter), which enables free vocal control without straining the larynx. This paper presents methods for the acoustic processing of the laryngeal tone, allowing for an objective assessment of the classical singing voice. Particular attention is paid to the differentiation of specific registers (levels) within the vocal range.*

## Mechanizm adaptacji tonu krtaniowego na przykładzie tematu miłosnego z Arii

*The mechanism of laryngeal tone adaptation, as illustrated by the love theme from Aria*

*Wiesław Wszolek, Zdzisław Madej, Anna Wójcik*  
*wwszolek@agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Adaptacyjne przetwarzanie tonu krtaniowego w *temacie miłosnym* arii G. Pucciniego *Che gelida manina* polega na utrzymaniu stabilnego, energetycznie niższego punktu fonacyjnego, który jest następnie warstwowo przetwarzany przez piętra krtani i trakt głosowy, bez wzrostu podciśnienia wraz z wysokością, co umożliwia pełne wykorzystanie harmonicznym w trudnej tessiturze przy zachowaniu intymnego charakteru tematu miłosnego. W ujęciu, które proponuje (i które jest spójne z nowoczesnym myśleniem źródłowo-filtracyjnym), ton krtaniowy nie jest produktem *rezonansu*, lecz:

- pierwotnym sygnałem fonacyjnym,
- o zachowanej częstotliwości podstawowej ( $F_0$ ),
- z określoną strukturą harmoniczną i komponentą szumową,
- stabilizowanym poprzez relację podciśnienia ( $P_{sub}$ ) do zadania muzycznego, a nie przez samą wysokość dźwięku.

Adapatacja w tym kontekście oznacza, że:

- ton krtaniowy pozostaje funkcjonalnie niżej niż linia melodyczna,
- jest energetycznie i sensorycznie *podłożony* pod frazę wokalną,
- a jego przetwarzanie odbywa się warstwowo, w kolejnych *piętrach* jamy krtaniowej i nadkrtaniowej.

Nie jest to więc obniżenie wysokości, lecz przesunięcie punktu odniesienia kontroli fonacyjnej poniżej poziomu realizowanej frazy muzycznej. W prezentowanym artykule przedstawione zostaną wstępne wyniki badań dotyczących przetwarzania tonu krtaniowego, na przykładzie realizacji miłosnej partii tenorowej z opery Pucciniego. Przedstawione zostaną wybrane parametry w dziedzinie czasowej i częstotliwościowej, potwierdzające prawidłową bądź nieprawidłową adaptacją tonu krtaniowego.

*Adaptive processing of the laryngeal tone in the love theme of G. Puccini's aria Che gelida manina consists of maintaining a stable, lower-energy phonation point, which is then layered through the laryngeal floors and vocal tract without an increase in negative pressure with pitch, allowing for the full utilization of harmonics in a difficult tessitura while preserving the intimate character of the love theme. In the approach I propose (and which is consistent with modern source-filter thinking), the laryngeal tone is not a product of resonance, but rather:*

- *a primary phonatory signal,*
- *with a preserved fundamental frequency ( $F_0$ ),*

- *with a specific harmonic structure and noise component,*
- *stabilized by the relationship between negative pressure ( $P_{sub}$ ) and the musical task, rather than by pitch alone.*

*Adaptation in this context means that:*

- *the laryngeal tone remains functionally lower than the melodic line,*
- *it is energetically and sensorially underpinned by the vocal phrase,*
- *and its processing occurs in layers, across successive levels of the laryngeal and supralaryngeal cavities.*

*This is therefore not a lowering of pitch, but rather: a shift of the reference point for phonatory control below the level of the musical phrase being performed. This article presents preliminary findings from research on laryngeal tone processing, using the performance of a romantic tenor aria from a Puccini opera as an example. Selected parameters in the time and frequency domains will be presented, confirming either correct or incorrect adaptation of laryngeal tone.*

# Doświadczaj ciszy w budynkach



## Walraven VibraTek®

Drgania i hałas generowane przez urządzenia techniczne rozchodzą się po całym budynku. Linia produktów **Walraven VibraTek®** - elastomerowe i sprężynowe izolatory wibroakustyczne - skutecznie eliminuje ten problem w instalacjach HVAC, chłodniczych, wentylacyjnych i przemysłowych, redukując drgania u źródła i zapewniając bezpieczeństwo, trwałość instalacji oraz komfort akustyczny użytkowników. Najlepsze efekty osiąga się, gdy wibroizolacja jest częścią projektu od samego początku, dlatego oferujemy wsparcie eksperckie na etapie doboru i projektowania. Grupa produktowa **Walraven VibraTek®** stanowi element systemu Walraven, co zapewnia pełną integralność, tworząc kompletne, inżyniersko zaprojektowane rozwiązanie od jednego partnera.



Dowiedz się jak  
możemy Cię  
wspierać!

## **Streszczenia prac konkursowych**



## **Optymalizacja parametrów akustycznych wewnątrz obiektu historycznego przy uwzględnieniu potrzeby zachowania wartości dziedzictwa kulturowego**

*Optimisation of the acoustic parameters of a historic building's interior, taking into account the need to preserve its cultural heritage*

*Tomasz Bębenkowski, Katarzyna Gajewska, Błażej Korzeniak, Jakub Skrzyp, Bogusław Loch, Oleksandr Andruskho, Hanna Maciejewska, Magdalena Kocha, Szymon Drzewiecki, Dominik Bekus, Marta Chmielińska, Dawid Machura, Michał Marchac*

*tb302199@student.polsl.pl*

Politechnika Śląska

W artykule przedstawiono wpływ zastosowania prototypowego panela akustycznego na parametry akustyczne, w tym czas pogłosu, wewnątrz zabytkowego obiektu historycznego. Tego typu obiekty często zmieniają swoją pierwotną funkcję użytkową. Ich adaptacja na inną funkcję związana jest często z potrzebą zapewnienia odpowiednich parametrów akustycznych do odsłuchu słowa mówionego lub muzyki. Przeprowadzanie adaptacji akustycznych w takich wnętrzach jest utrudnione ze względu na potrzebę zachowania ich pierwotnego wyglądu często zawierającego różne malowidła, rzeźbienia, skomplikowany kształt sufitu – stanowiące element ochrony materialnego dziedzictwa kulturowego. W pracy zaproponowano podejście polegające na modyfikacji obszaru przeznaczonego dla widowni. Wykonano niewielkich rozmiarów panele akustyczne umożliwiające ich umiejscowienie w obrębie ławek lub krzeseł. Takie podejście ingeruje w małym stopniu w aspekty wizualne wnętrza. Ponadto modułowa budowa paneli pozwala w prosty sposób dokonywać zmian chłonności akustycznej wnętrza dostosowując je do aktualnych potrzeb. W pracy przeprowadzono pomiary laboratoryjne parametrów akustycznych paneli oraz sprawdzono możliwość ich zastosowania na obiekcie zabytkowym w warunkach rzeczywistych.

*This article presents the impact of using a prototype acoustic panel on the acoustic parameters, including reverberation time, of a historic building. Such buildings often undergo a change in their original functional use. Their conversion to a new purpose is frequently associated with the need to ensure appropriate acoustic conditions for listening to speech or music. Carrying out acoustic adaptations in such interiors is difficult due to the need to preserve their original appearance, which often includes various paintings, carvings, and complex ceiling shapes—elements that constitute part of the protection of tangible cultural heritage. This study proposes an approach involving modifications to the audience area. Small-scale acoustic panels were fabricated to be installed within the benches or chairs. This approach has minimal impact on the interior's visual appearance. Furthermore, the modular design of the panels makes it easy to adjust the interior's sound absorption to meet current needs. The study included laboratory measurements of the panels' acoustic parameters and tested their applicability in a historic building under real-world conditions.*

## **Zastosowanie grup parametrów cepstralnych w automatycznym rozpoznawaniu instrumentów muzycznych**

*The use of cepstral parameter groups in automatic musical instrument recognition*

*Gabriela Hołowiej, Piotr Pruchnicki*

*gabriela.holowiej@gmail.com*

Politechnika Wroclawska

Niniejszy referat przedstawia wyniki badania wpływu zastosowania parametrów cepstralnych na skuteczność klasyfikacji instrumentów muzycznych przez sieć neuronową. W badaniach wykorzystano bazę nagrań ośmiu instrumentów dętych oraz 70 parametrów wyznaczanych w programie MATLAB. Do klasyfikacji zastosowano czterowarstwową sieć neuronową typu MLP, a skuteczność analizowano na podstawie macierzy konfuzji dla poszczególnych stadiów dźwięku i różnych zestawów parametrów.

*This paper presents the results of a study on the impact of using cepstral parameters on the effectiveness of musical instrument classification performed by a neural network. The experiments were conducted using a dataset of recordings of eight wind instruments and 70 acoustic parameters extracted in MATLAB. A four-layer MLP neural network was used for classification, and its performance was evaluated based on confusion matrices computed for different sound stages and various parameter subsets.*

## Wizualizacja propagacji dźwięku w pomieszczeniach z wykorzystaniem technik ambisonicznych

*Room acoustics visualization based on ambisonic spatial impulse responses*

*Weronika Jankowska, Maciej Jasiński*

*01187334@pw.edu.pl*

Politechnika Warszawska

Techniki ambisoniczne, poza zastosowaniami artystycznymi, mogą być z powodzeniem wykorzystywane w pomiarach akustycznych do wizualizacji odbić dźwięku w określonym punkcie w przestrzeni. W odróżnieniu od klasycznej odpowiedzi impulsowej, analiza sygnału ambisonicznego z wykorzystaniem harmonik sferycznych umożliwia oszacowanie wektorów kierunku docierania dźwięku do mikrofonu. W niniejszej pracy przedstawiono system przetwarzania ambisonicznych przestrzennych odpowiedzi impulsowych. Zaprezentowano autorską aplikację umożliwiającą wizualizację amplitudy odbić dźwięku zobrazowaną na fotografii sferycznej (360°). Informacje o kierunkach docierania dźwięku do odbiornika oraz jego amplitudzie nanoszone są w postaci map kolorów, co pozwala oceniać odbicia w funkcji czasu. System umożliwia także auralizację dźwięku w symulowanym pomieszczeniu. Testy przeprowadzone w studiu nagraniowym potwierdziły poprawność działania.

*Ambisonic techniques, beyond their artistic applications, can be successfully employed in acoustic measurements for visualizing sound reflections at a defined point in space. Unlike conventional impulse responses, the analysis of ambisonic signals using spherical harmonics enables estimation of the direction-of-arrival (DOA) vectors of sound reaching the microphone. This paper presents a processing system for ambisonic spatial impulse responses (SIRs). A custom application is introduced, enabling visualization of the amplitude of sound reflections mapped onto a spherical (360°) photograph. Information regarding the direction of arrival and the amplitude of sound at the receiver is rendered as color maps, allowing reflection analysis as a function of time. The system also supports auralization of sound within a simulated room. Tests conducted in a recording studio confirmed the correct operation of the system.*

## **Właściwości akustyczne elastycznych metamateriałów w zależności od stopnia zakrzywienia struktury**

*Properties of flexible acoustic metamaterials depending on the degree of curvature of the structure*

*Tytus Nowak, Klara Chojnacka*

*tytnow@student.agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Metamateriały akustyczne to struktury, których właściwości wynikają z odpowiednio zaprojektowanej geometrii i lokalnych rezonansów prowadzących do powstawania pasm zaporowych. W większości dotychczasowych rozwiązań stosuje się panele sztywne, co ogranicza ich wykorzystanie w aplikacjach wymagających podatności mechanicznej i dopasowania do zakrzywionych powierzchni. Elastyczne metamateriały akustyczne stanowią obiecującą alternatywę, jednak wpływ ich deformacji na izolacyjność akustyczną pozostaje słabo rozpoznany. W niniejszym artykule przeanalizowano koncepcję elastycznych metamateriałów akustycznych, łączących zdolność kształtowania pola akustycznego z możliwością mechanicznego przestrajania układu. Przedstawiono wyniki symulacji numerycznych w środowisku COMSOL Multiphysics oraz wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na fizycznym prototypie w komorze pogłosowej. W końcowej części pracy zbadano wpływ stopnia zakrzywienia struktury na jej właściwości akustyczne.

*Acoustic metamaterials are structures whose properties result from a carefully designed geometry and local resonances that lead to the formation of bandgaps. Most existing solutions use rigid panels, which limits their use in applications requiring mechanical flexibility and adaptation to curved surfaces. Flexible acoustic metamaterials represent a promising alternative; however, the impact of controlled deformation of the metamaterial on acoustic insulation remains poorly understood. As part of the project, a numerical model of the basic cell of a flexible metamaterial was developed, enabling the structure to be curved by a specified angle. The simulations were performed in the COMSOL Multiphysics environment using the Pressure Acoustics and Shell modules. A single unit cell consists of two perforated PVC films spaced apart, with specified dimensions and thickness, and a hole of a specified diameter. The numerical analysis allowed for the evaluation of changes in the structure's resonance frequencies and modifications to the band of enhanced acoustic insulation as a function of the bending angle. Based on this, configurations were selected for experimental testing. Prototypes of the flexible metamaterial were fabricated for selected variants and subjected to acoustic insulation measurements in the measurement window of the reverberation chamber at the AGH Technical Acoustics Laboratory. The results indicate that the controlled curvature of the structure affects the transmission characteristics of the panel, which allows for the determination of practical limitations and adaptation possibilities for flexible acoustic metamaterials.*

## **Implementacja i testy algorytmu do akustycznej komunikacji z wykorzystaniem modulacji BFSK**

*Acoustic communication protocol for an autonomous underwater vehicle*

*Julia Sadecka*

*sadecka@student.agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

W artykule przedstawiono projekt oraz implementację protokołu komunikacji akustycznej przeznaczonego dla autonomicznego robota podwodnego (AUV). Zaproponowane rozwiązanie bazuje na modulacji BFSK oraz uproszczonej strukturze ramki, inspirowanej protokołem JANUS. Omówiono implementację oraz założenia algorytmu. Przeprowadzono badania eksperymentalne na powierzchni oraz w zamkniętym basenie, analizując wpływ parametrów na skuteczność odbioru danych. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość komunikacji akustycznej.

*I will present the design and implementation of an acoustic communication protocol intended for an autonomous underwater vehicle (AUV). The proposed solution is based on BFSK modulation and a simplified frame structure inspired by the JANUS protocol. The implementation and underlying algorithmic assumptions will be discussed. Experimental studies were conducted both on the water surface and in a closed pool environment to analyze the impact of transmission parameters on data reception performance. The obtained results confirm the feasibility of acoustic communication in such conditions.*

## Pomiar poziomu hałasu impulsowego od broni palnej

*Impulse noise level measurement from firearms*

*Martyna Stoszek, Przemysław Plaskota*

*m100szek@gmail.com*

Politechnika Wrocławska

Celem pracy było wykonanie pomiarów poziomu hałasu od strzelnicy sportowej z uwzględnieniem narażenia osób zamieszkujących w najbliższym sąsiedztwie oraz użytkowników strzelnicy. Skupiono się przy tym na problemie dokuczliwości dźwięków impulsowych, jakimi są wystrzały z broni palnej. W przypadku hałasu impulsowego obowiązujące w Polsce rozporządzenie dotyczące pomiarów wielkości emisji wymaga stosowania poprawki impulsowej, której wartość jest stała, niezależna od różnic między poszczególnymi źródłami dźwięku z danej kategorii. Z tego powodu zdecydowano się na porównanie używanej obecnie metody z metodą Nordtest, która uzależnia wartość poprawki impulsowej od indywidualnych parametrów impulsu. Badania koncentrują się na hałasie środowiskowym oraz hałasie na stanowisku strzelca i obserwatora. Do pomiarów wykorzystano 7 różnych rodzajów broni oraz dodatkowe urządzenia – tłumik i kompensatory odrzutu. Szczegółowa analiza wszystkich zarejestrowanych wystrzałów umożliwiła porównanie stosowanych metod oceny hałasu impulsowego. Zaobserwowane różnice są związane z odległością od źródła dźwięku – w przypadku hałasu środowiskowego, wartości otrzymane przy użyciu metody Nordtest są mniejsze od tych uzyskanych metodą z rozporządzenia. Z kolei dla pomiarów przeprowadzonych na stanowiskach strzelca i obserwatora występuje odwrotna zależność. Praca wykazuje, że obowiązujące rozporządzenie w dużym stopniu generalizuje impulsy pochodzące od różnych źródeł hałasu, podczas gdy ich parametry potrafią być zupełnie inne. Metoda Nordtest zapewnia bardziej dokładny opis analizowanych zdarzeń akustycznych, zagłębiając się w ich indywidualny charakter. Jest to podstawa do wprowadzenia zmian w polskim prawie w temacie prowadzenia pomiarów hałasu impulsowego.

*The objective of this study was to measure noise levels originating from a sports shooting range, taking into account the exposure of both nearby residents and range users. The research focused specifically on the issue of annoyance caused by impulsive sounds, such as firearm shots. In the case of impulsive noise, the current Polish regulation regarding emission measurements requires the application of an impulse correction, the value of which is constant and independent of the differences between individual sound sources within a given category. For this reason, it was decided to compare the currently used method with the Nordtest method, which bases the impulse correction value on the individual parameters of the impulse. The study concentrates on environmental noise as well as noise at the shooter's and observer's positions. Seven different types of weapons were used for the measurements, along with additional equipment such as suppressor and recoil compensators. A detailed analysis of all recorded shots enabled a comparison of the applied impulsive noise assessment methods. The observed differences are related to the distance from the*

*sound source; in the case of environmental noise, the values obtained using the Nordtest method are lower than those obtained using the method prescribed by the regulation. Conversely, an opposite relationship occurs for measurements conducted at the shooter and observer positions. This work demonstrates that the current regulation significantly generalizes impulses from various noise sources, even though their parameters can vary substantially. The Nordtest method provides a more accurate description of the analyzed acoustic events by delving into their individual characteristics. This serves as a basis for introducing changes to Polish law regarding impulsive noise measurements.*

## **Modelowanie toru hydroakustycznego oraz estymacja kierunku źródła dźwięku**

*Hydroacoustic signal path modelling and sound source direction estimation*

*Zofia Szymczykowska, Emilia Szewczyk, Ryszard Olszewski*

*zofiasz@student.agh.edu.pl, Emis@student.agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

Praca dotyczy zagadnienia modelowania toru hydroakustycznego oraz algorytmu estymacji kierunku fali akustycznej, z którego dociera ona do robota w środowisku podwodnym. Celem pracy jest wstępna walidacja modelu i metody lokalizacji źródła dźwięku w ramach projektu robota podwodnego rozwijanego w Studenckim Kole Naukowym AGH Marines.

Opracowano model toru hydroakustycznego w środowisku MATLAB/Simulink. Uwzględnia on wybrane rzeczywiste zjawiska takie jak szумы środowiska wodnego i układów elektronicznych, filtrację oraz kwantyzację. W celu estymacji kierunku, z którego dociera fala akustyczna do hydrofonów, stosuje się metodę opartą na analizie różnic czasów przybycia (ang. *TDOA – Time Difference of Arrival*), wyznaczaną na podstawie korelacji wzajemnej sygnałów zarejestrowanych przez układ przetworników.

Przeprowadzone pierwsze badania symulacyjne wskazują na poprawność identyfikacji kierunku źródła dźwięku. Praca stanowi etap wstępny i jest rozwijana w celu uwzględniania bardziej złożonych zjawisk akustycznych takich jak, na przykład, wielokierunkowość propagacji sygnałów, a także w zakresie testowania oraz optymalizowania alternatywnych algorytmów lokalizacyjnych oraz geometrii układu hydrofonów.

*The paper addresses the problem of modelling a hydroacoustic signal path and developing an algorithm for estimating the direction of arrival of an acoustic wave reaching an underwater robot. The aim of the study is the preliminary validation of both the model and the sound source localisation method within the framework of an underwater robot project developed by the Student Research Group AGH Marines.*

*A hydroacoustic signal path model was developed in the MATLAB/Simulink environment. The model incorporates selected real-world phenomena, including environmental noise in water, electronic system noise, filtering, and quantisation effects. To estimate the direction of arrival of the acoustic wave at the hydrophones, a method based on Time Difference of Arrival (TDOA) analysis is employed, determined from the cross-correlation of signals recorded by the transducer array.*

*Initial simulation studies indicate correct identification of the sound source direction. The work constitutes a preliminary stage and is being further developed to account for more complex acoustic phenomena, such as multipath propagation, as well as to enable the testing and optimisation of alternative localisation algorithms and hydrophone array geometries.*

## **Prace konkursowe**



# Zastosowanie grup parametrów cepstralnych w automatycznym rozpoznawaniu instrumentów muzycznych

*Gabriela Hołowiej, Piotr Pruchnicki*

*gabriela.holowiej@gmail.com*

Politechnika Wroclawska

**Abstract** Niniejszy referat przedstawia wyniki badania wpływu zastosowania parametrów cepstralnych na skuteczność klasyfikacji instrumentów muzycznych przez sieć neuronową. W badaniach wykorzystano bazę nagrań ośmiu instrumentów dętych oraz 70 parametrów wyznaczanych w programie MATLAB. Do klasyfikacji zastosowano czterowarstwową sieć neuronową typu MLP, a skuteczność analizowano na podstawie macierzy konfuzji dla poszczególnych stadiów dźwięku i różnych zestawów parametrów.

## 1. Wprowadzenie

We współczesnych systemach przetwarzania dźwięku coraz częściej wykorzystywane są metody uczenia maszynowego służące do automatycznej analizy i interpretacji sygnałów akustycznych. Jednym z dynamicznie rozwijających się obszarów jest rozpoznawanie instrumentów muzycznych, które stosowane jest w zagadnieniach, takich jak indeksowanie nagrań i analiza muzyki. Są to zagadnienia złożone, z uwagi na zależność barwy instrumentów od wielu czynników i tym samym dużą zmienność parametrów między podobnie brzmiącymi dźwiękami.

W ostatnich latach znaczący postęp w tej dziedzinie umożliwiły techniki ekstrakcji parametrów oraz modele uczenia głębokiego, potrafiące wykryć nieliniowe zależności w danych dźwiękowych, których. Artykuły Blaszkę i Kostka [1] oraz badaczy z Mianyang Normal University [2] należą do najnowszych publikacji naukowych badających to zagadnienie. W niniejszej pracy porównano wyniki osiągnięte przez system klasyfikacji instrumentów dętych oparty na 70 parametrach sygnału oraz czterowarstwowej sieci neuronowej typu MLP do wyników uzyskanych przez tę samą sieć po usunięciu grup najmniej istotnych parametrów dla sieci. Celem pracy jest ocena wpływu zastosowania podczas procesu uczenia parametrów MFCC, Delta MFCC oraz GTCC na skuteczność rozpoznawania instrumentów muzycznych przez model sieci neuronowej.

## 2. Baza dźwiękowa

Wykorzystany w pracy zestaw danych obejmuje bazę dźwiękową zawierającą 2088 próbek pojedynczych dźwięków ośmiu instrumentów dętych. Jest to baza nagrań w formacie WAV, zarejestrowanych z częstotliwością próbkowania 44,1 kHz i rozdzielczością bitową 64 bitów float za pomocą pojemnościowego mikrofonu Superlux ECM999. Próbkę wszystkich instrumentów, z wyjątkiem organów nagrano w pomieszczeniu z niewielką adaptacją akustyczną celem uzyskania nagrań niestudyjnych, lecz dobrej jakości oraz mikrofon umiejscowiono w odległości 1 metra od instrumentu, aby zminimalizować występowanie dźwięków ruchomych elementów instrumentów w rejestrowanym sygnale.

Każda z próbek zawiera jeden wydłużony dźwięk danego instrumentu o czasie trwania od 1 do 2 sekund, a wszystkie próbki jednego instrumentu tworzą jedną klasę.

Tabela 1: Liczności klas bazy dźwiękowej

Instrument	Trąbka	Waltornia	Flet	Fagot
Liczba próbek	162	276	222	246
Instrument	Akordeon	Organy 1	Organy 2	Organy 3
Liczba próbek	222	312	330	318

Zostały również stworzone bazy próbek skróconych do pojedynczych stadiów dźwięku: nabrzmiewania, trwającego pierwsze 150 ms; wybrzmiewania, trwającego ostatnie 300 ms i ustalonego, stanowiącego pozostałą część próbki.

### 3. Parametryzacja dźwięków

W celu przygotowania danych do klasyfikacji przeprowadzono parametryzację nagrań dźwiękowych obejmującą ekstrakcję parametrów z kolejnych ramek, następnie ich uśrednienie w obrębie próbki i znormalizowanie w środowisku MATLAB. Analizowane parametry zdefiniowane zostały na podstawie dokumentacji biblioteki Audio Toolbox zawierającej parametry:

- Spectral Centroid – miarę środka ciężkości widma,
- Spectral Flux – miarę zmienności widma w czasie,
- Spectral Rolloff Point – wyznaczający częstotliwość, poniżej której znajduje się 95% energii sygnału,
- Spectral Slope – opisujący spadek amplitudy w dziedzinie częstotliwości za pomocą funkcji liniowej,
- Spectral Spread – wskazujący stopień rozproszenia energii widma wokół środka ciężkości widma,
- Spectral Decrease – opisujący spadek amplitudy w dziedzinie częstotliwości, bez funkcji liniowej,
- Spektrogram w skali melowej,
- 13 współczynników MFCC (ang. *Mel Frequency Cepstral Coefficients*),
- 13 współczynników Delta MFCC,
- 13 współczynników GTCC (ang. *Gammatone Cepstral Coefficients*),

oraz biblioteki Signal Processing Toolbox zawierającej parametry:

- Spectral Flatness – wskazujący odchylenie widma sygnału od widma płaskiego,
- Spectral Skewness – miarę asymetrii częstotliwości mniejszych i większych od środka ciężkości widma,
- Spectral Kurtosis – określający niegaussowość widma wokół środka ciężkości widma,

- Spectral Crest – wyznaczający stosunek amplitudy najwyższego szczytu w widmie do średniej arytmetycznej widma,
- Spectral Entropy – miarę szczytowości widma.

Aby zbadać wpływ wykorzystania podczas procesu uczenia parametrów MFCC, Delta MFCC oraz GTCC, przygotowano zestawy parametrów zawierające wszystkie 70 parametrów, jak i pozbawione kolejnych ich grup.

## 4. Metody klasyfikacji

W celu implementacji sieci neuronowej typu MLP zastosowany został w języku Python model Sequential z warstwami ukrytymi neuronów aktywowanych funkcją ReLU oraz z zastosowaniem funkcji Dropout i EarlyStopping, chroniących sieć przed przeuczeniem. Zdefiniowany został także podział próbek na zbiór uczący i testowy w proporcjach 80:20.

Sieć wzorcowa jest siecią MLP złożoną z czterech warstw: warstwy wejściowej zawierającej 70 neuronów, pierwszej warstwy ukrytej – 70 neuronów, drugiej warstwy ukrytej – 48 neuronów oraz warstwy wyjściowej – 8 neuronów. Na jej podstawie zostały stworzone sieci uczone za pomocą niepełnych zestawów parametrów, z dostosowaną do mniejszej liczby parametrów wejściowych liczebnością neuronów w kolejnych warstwach sieci:

- brak jednej grupy parametrów: 57 neuronów → 57 neuronów → 32 neurony → 8 neuronów,
- brak dwóch grup parametrów: 44 neurony → 44 neurony → 24 neurony → 8 neuronów,
- brak trzech grup parametrów: 31 neuronów → 31 neuronów → 24 neurony → 8 neuronów.

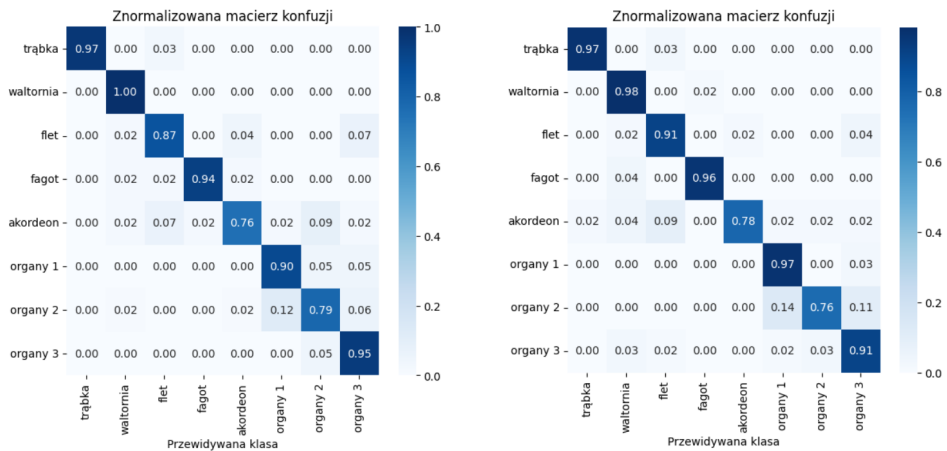
## 5. Wyniki klasyfikacji

Uzyskane przez sieci wyniki klasyfikacji przedstawione zostały w postaci macierzy konfuzji wyznaczanych ze zbioru testowego. Umożliwiło to zbadanie bezpośredniego wpływu grup parametrów MFCC, Delta MFCC oraz GTCC na działanie sieci. Na Rys. 1 przedstawione zostało porównanie macierzy konfuzji dla sieci uczonej na podstawie próbek zawierających wyłącznie stadium nabrzmiewania.

Sieć uczone na podstawie zestawu bez trzech grup parametrów uzyskała wyniki zbliżone do sieci korzystającej z pełnego zestawu. Jedyńm instrumentem, dla którego różnice skuteczności między macierzami konfuzji wyniosły więcej, niż 5%, są organy 1. Usunięcie z zestawu parametrów trzech grup pozwoliło na zwiększenie skuteczności klasyfikacji tej klasy o 7 punktów procentowych i znaczne zmniejszenie liczby pomyłek klasy z organami 2 i 3.

Eksperymenty przeprowadzone dla pozostałych konfiguracji zestawów parametrów wykazały, że odrzucenie z zestawu parametrów wszystkich trzech grup zapew-

nia dla stadium nabrzmiewania otrzymanie lepszych rezultatów, niż przy usunięciu tylko części z nich. Dla sieci uczonej na zestawie bez grup MFCC i Delta MFCC, ale z pozostawionymi współczynnikami GTCC, dla fletu, akordeonu, organów 2 i 3 zaobserwowano pogorszenie skuteczności między 6 a 11 punktów procentowych.



(a) Pełny zestaw parametrów

(b) Zestaw bez trzech grup parametrów

Rysunek 1: Znormalizowane macierze konfuzji dla stadium nabrzmiewania

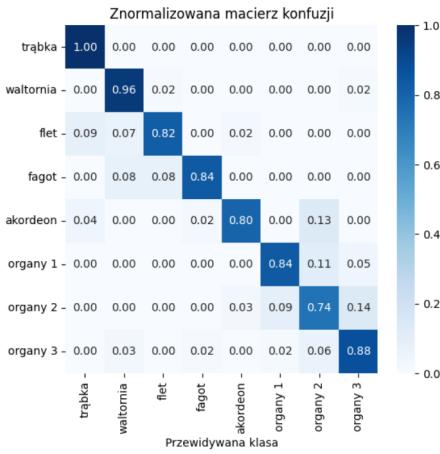
Dla próbek obejmujących stadium ustalone, przed oraz po odrzuceniu trzech grup parametrów uzyskano macierze konfuzji przedstawione na Rys. 2.

Najbardziej wyraźne pogorszenie wyników (o 35 punktów procentowych) występuje dla organów 3, co wynika z obecności istotnych pomyłek tej klasy z trąbką i waltornią. Pozostałe instrumenty zostały również sklasyfikowane z mniejszą skutecznością, jednak dla żadnego z nich spadek skuteczności nie przekroczył 10 punktów procentowych.

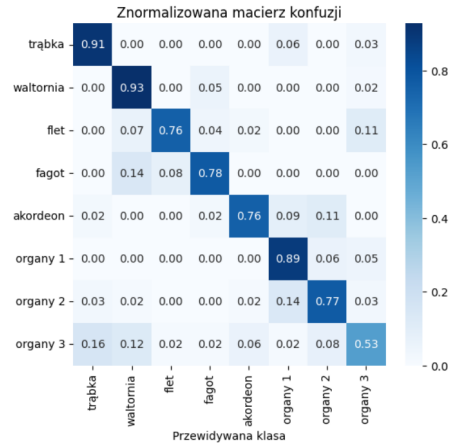
Podobnie jak dla próbek zawierających stadium nabrzmiewania, dla innych konfiguracji zestawów parametrów uczących sieć rozpoznawać próbki ustalonego uzyskiwane były gorsze wyniki, zwłaszcza gdy zestaw parametrów nie zawierał dwóch grup parametrów cepstralnych. Przy odrzuceniu jednej grupy skuteczność klasyfikacji nie zmniejszyła się znacząco.

Na Rys. 3 zamieszczono macierze konfuzji przed i po odrzuceniu trzech grup parametrów cepstralnych dla próbek zawierających stadium wybrzmiewania.

Usunięcie trzech grup z zestawu parametrów wejściowych sieci dla części instrumentów, takich jak trąbka i fagot, spowodowało pogorszenie skuteczności klasyfikacji, jednak zwiększyło uzyskiwaną przez sieć skuteczność dla fletu oraz organów 1, 2 i 3.

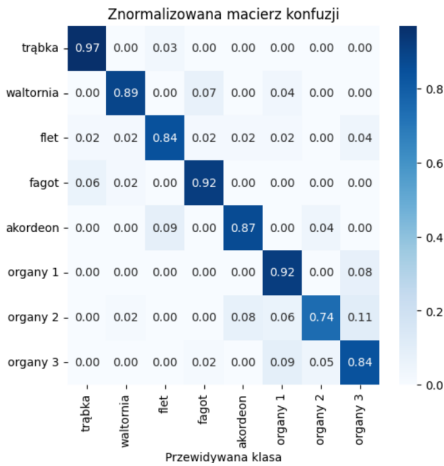


(a) Pełny zestaw parametrów

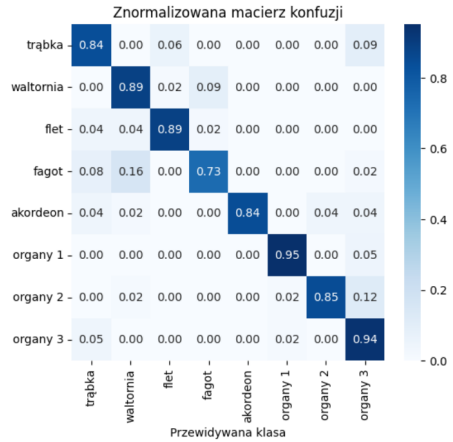


(b) Zestaw bez trzech grup parametrów

Rysunek 2: Znormalizowane macierze konfuzji dla stadium ustalonego



(a) Pełny zestaw parametrów



(b) Zestaw bez trzech grup parametrów

Rysunek 3: Znormalizowane macierze konfuzji dla stadium wybrzmiewania

## 6. Wnioski

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że dla stadium ustalonego podobnie jak dla stadium nabrzmiewania, przy odrzuceniu tylko dwóch z trzech grup uzyskane zostały gorsze wyniki, niż przy odrzuceniu wszystkich trzech grup parametrów

cepstralnych. Dla stadium wybrzmiewania natomiast odrzucenie dwóch grup parametrów nie spowodowało istotnego spadku skuteczności klasyfikacji, ale też jej nie zwiększyło, tak jak w przypadku usunięcia trzech grup. We wszystkich przypadkach odrzucenie jednej lub trzech grup parametrów cepstralnych z wektora wejściowego sieci pozwoliło na uzyskanie porównywalnej skuteczności klasyfikacji, a odrzucenie dwóch grup – zmniejszenie skuteczności.

## Bibliografia

- [1] Blaszkę M., Kostek B. (2022) *Musical Instrument Identification Using Deep Learning Approach*, Sensors (Basel).
- [2] Zhou N. (2024) *Musical instrument recognition based on convolutional neural network*, 2024 International Conference on Distributed Computing and Optimization Techniques (ICDCOT).

# Wizualizacja propagacji dźwięku w pomieszczeniach z wykorzystaniem technik ambisonicznych

*Weronika Jankowska, Maciej Jasiński*

*01187334@pw.edu.pl*

Politechnika Warszawska

**Abstract** Techniki ambisoniczne, poza zastosowaniami artystycznymi, mogą być z powodzeniem wykorzystywane w pomiarach akustycznych do wizualizacji odbić dźwięku w określonym punkcie w przestrzeni. W odróżnieniu od klasycznej odpowiedzi impulsowej, analiza sygnału ambisonicznego z wykorzystaniem harmonik sferycznych umożliwia oszacowanie wektorów kierunku docierania dźwięku do mikrofonu. W niniejszej pracy przedstawiono system przetwarzania ambisonicznych przestrzennych odpowiedzi impulsowych. Zaprezentowano autorską aplikację umożliwiającą wizualizację amplitudy odbić dźwięku zobrażowaną na fotografii sferycznej (360°). Informacje o kierunkach docierania dźwięku do odbiornika oraz jego amplitudzie nanoszone są w postaci map kolorów, co pozwala oceniać odbicia w funkcji czasu. System umożliwia także auralizację dźwięku w symulowanym pomieszczeniu. Testy przeprowadzone w studiu nagraniowym potwierdziły poprawność działania.

## 1. Wstęp

Każde pomieszczenie można scharakteryzować za pomocą jego odpowiedzi impulsowej (RIR - ang. *Room Impulse Response*). Opisuje ona transmitancję pomiędzy źródłem dźwięku a mikrofonem i pozwala między innymi na wyodrębnienie czasu docierania poszczególnych odbić dźwięku. Analiza RIR umożliwia określenie takich parametrów jak czas pogłosu w funkcji częstotliwości. Przestrzenna odpowiedź impulsowa pozwala również na pozyskanie informacji na temat kierunków, w jakich rozchodzi się dźwięk, a także umiejscowienia jego odbić. Taki rodzaj odpowiedzi impulsowej jest ściśle powiązany z ambisonią. Zagadnienie to jest rozwijane od 1970 roku, kiedy to wynaleziono format ambisoniczny pierwszego rzędu [1]. Do rejestracji dźwięku w formacie ambisonicznym wykorzystuje się matryce mikrofonowe (w ambisonii pierwszego rzędu są to 4 kapsuły mikrofonowe)[1, 2]. Umożliwia to uzyskanie informacji o kierunku docierania dźwięku, dzięki czemu możliwe jest zachowanie pełnej informacji o polu dźwiękowym. Przestrzenna odpowiedź impulsowa może być wykorzystana do wizualizacji, które to mogą służyć jako narzędzie do opracowywania adaptacji akustycznych.

Akustyka architektoniczna jest istotną dziedziną akustyki. Skupia się na odpowiednim planowaniu przestrzeni, tak, aby mogła ona spełniać określone funkcje. W zależności od przeznaczenia pomieszczenia, wymaga ono innej adaptacji, aby panowały w nim pożądane warunki. Istnieją programy służące do symulacji akustycznych, jednak nie opracowano żadnej powszechnie stosowanej aplikacji, która umożliwiłaby wizualizację zjawisk akustycznych zachodzących w pomieszczeniu. Celem projektu będącego tematem niniejszego artykułu jest implementacja takiego narzędzia. Zaproponowane rozwiązanie ma umożliwić intuicyjną analizę właściwości akustycznych wnętrz.

W celu odzwierciedlenia akustyki pomieszczenia w sposób oddziałujący na zmysł słuchu, zdecydowano się ponadto na opracowanie modułu auralizacji, który pozwoli na symulację odsłuchu dźwięku w badanym miejscu.

## 2. Metodyka i implementacja

### 2.1. Pomiar odpowiedzi impulsowej

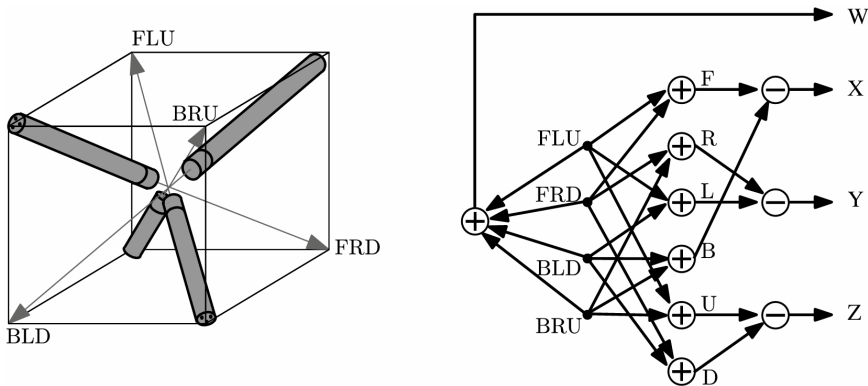
Typowo RIR (*Room Impulse Response*) rejestruje się za pomocą wszechkierunkowego mikrofonu pomiarowego [3]. Pomiar można jednak wykonać również za pomocą mikrofonu ambisonicznego, który umożliwia rejestrację przestrzennej odpowiedzi impulsowej. Pozwala ona nie tylko uzyskać informacje na temat czasu pogłosu i innych właściwości akustycznych wnętrza, ale także na temat dokładnego sposobu propagacji dźwięku w przestrzeni. W realizowanym projekcie do pomiarów wykorzystano mikrofon ambisoniczny pierwszego rzędu (model AMBEO® VR MIC firmy Sennheiser), wszechkierunkowe źródło dźwięku oraz komputer z oprogramowaniem Room EQ Wizard. Wygenerowano wykładniczy sygnał sinusoidalny (exponential sine sweep) w zakresie częstotliwości 20 Hz – 20 kHz. Pozwoliło to na zbadanie charakterystyki pomieszczenia w pełnym słyszalnym paśmie. Pomiarów wykonano dla czterech położenia źródła dźwięku i czterech położenia mikrofonu ambisonicznego, przy czym dla każdej z konfiguracji zmieniano zarówno położenie źródła, jak i położenie mikrofonu. W każdej konfiguracji powtórzono pomiar kilkukrotnie, aby uzyskać wiarygodne wyniki. Ponadto dla każdej pozycji mikrofonu wykonano zdjęcia sferyczne całego pomieszczenia, tak, aby perspektywa kamery była jak najbardziej zbliżona do położenia mikrofonu. W ten sposób zarejestrowane dane poddano dalszemu przetwarzaniu, aby zrealizować założenia projektu. Pomiarów wykonywano w studiu nagraniowym, w którym obecne są liczne ustroje akustyczne.

### 2.2. Konwersja formatów

Technika ambisoniczna zakłada, że pole dźwiękowe jest kodowane za pomocą harmonik sferycznych [1, 2]. Mikrofony ambisoniczne rejestrują sygnał dźwiękowy w A-formacie, który następnie należy przekonwertować do użytecznego B-formatu. W ambisonii pierwszego rzędu dzieje się to zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 1.

Mikrofon ambisoniczny pierwszego rzędu składa się z czterech kapsuł mikrofonowych rejestrujących dźwięk z kierunków FLU (Front-Left-Up), BRU (Back-Right-Up), BLD (Back-Left-Down) oraz FRD (Front-Right-Down). Sygnał z każdego z nich jest następnie przetwarzany, aby uzyskać cztery kanały: W, X, Y, Z. Dzieje się to poprzez operacje dodawania i odejmowania. Każdy z kanałów B-formatu odpowiada za określone parametry dźwięku: W jest sygnałem wszechkierunkowym, X, Y, Z odpowiadają mikrofonom dwukierunkowym odpowiednio w kierunkach przód-tył, lewo-prawo, góra-dół.

Kodowanie kanałów XYZ jest zatem intuicyjnie powiązane z trójwymiarowym układem kartezjańskim i umożliwia oszacowanie kierunków docierania dźwięku z przestrzeni, a kanał W pozwala uzyskać jego amplitudę. Sygnał dźwiękowy w B-formacie można poddać dalszemu przetwarzaniu, czego dokonano w opisywanym projekcie. Konwersję do B-formatu wykonano za pomocą wtyczki AMBEO A-B converter, dostarczaną przez producenta mikrofonu.



Rysunek 1: Schemat rejestracji A-formatu i kodowania do B-formatu [1]

### 2.3. Implementacja aplikacji

Założeniem opracowanej aplikacji było wczytanie odpowiedzi impulsowej w formacie `.wav` oraz zdjęcia sferycznego do dalszego przetworzenia. Jako język programowania wybrano Python. Wczytano pliki z tłem do wizualizacji w formacie `.jpg` oraz zmierzoną odpowiedź impulsową w formacie `.wav`. Odpowiedź impulsowa została rozdzielona na kanały W, X, Y, Z. Następnie podzielono ją również na ramki czasowe. Przyjęty czas trwania ramki to 2 ms, czyli czas, w którym fala dźwiękowa pokonuje około 69 cm. Założono, że taki przedział czasowy umożliwi wystarczająco dokładną analizę przy zachowaniu stosunkowo niskiego czasu obliczeń. Dla każdej ramki czasowej wyliczano iteracyjnie kąty azymutu  $\phi$  i elewacji  $\theta$ , które przeliczano następnie na współrzędne na zdjęciu sferycznym. Kąty te oblicza się z zależności geometrycznych określonych wzorami (1),(2) na podstawie danych z kanałów X, Y, Z [1].

$$\phi = \arctan 2(X, Y) \quad (1)$$

$$\theta = \arctan 2(Z, \sqrt{X^2 + Y^2}) \quad (2)$$

Kąt azymutu jest to kąt źródła dźwięku w płaszczyźnie poziomej, natomiast kąt elewacji dotyczy odchylenia źródła od płaszczyzny pionowej. Obliczenie tych wartości umożliwia wyznaczenie dokładnego położenia źródła dźwięku. Z uwagi na fakt, że zdjęcia wykonano z perspektywy mikrofonu, możliwe było przeliczenie kątów azymutu i elewacji na odpowiadające im współrzędne na zdjęciu. Współrzędne te obliczono zgodnie ze wzorami (3)-(4), gdzie  $h$  jest wysokością zdjęcia sferycznego, a  $w$  jego szerokością.

$$x = \frac{\phi + 180}{360 \cdot w} \quad (3)$$

$$y = \frac{90 - \theta}{180 \cdot h} \quad (4)$$

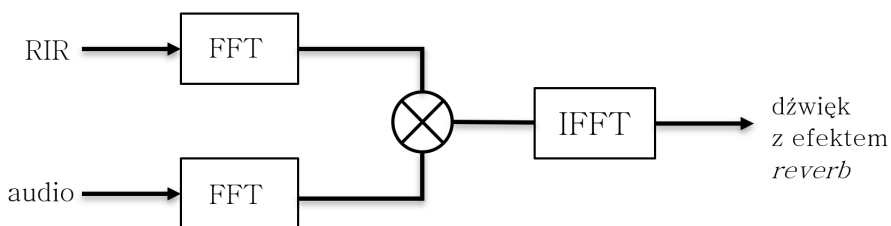
Wykorzystanie wymienionych zależności geometrycznych pozwoliło na przedstawienie trójwymiarowych danych o położeniu źródła dźwięku na płaszczyźnie dwuwymiarowej.

Dla każdej ramki czasowej zastosowano interpolację oraz filtrację Gaussa, aby wizualizacja uwzględniała rzeczywisty sposób propagacji fali akustycznej. Amplitudę dźwięku wyznaczano na podstawie kanału W odpowiedzi impulsowej, przy czym dla każdej klatki natężenie nakładane w postaci kolorów na zdjęcie było uśredniane względem całej odpowiedzi impulsowej, co pozwoliło na obserwację zanikania dźwięku. Jasnożółty kolor wskazywał na wysoką amplitudę dźwięku, natomiast słabsze odbicia zaznaczono kolorem czerwonym.

W celu optymalizacji procesu renderowania zaimplementowano kryteria jego wczesnego zakończenia. Algorytm przerywa generowanie kolejnych klatek w momencie, gdy maksymalna wartość bezwzględna amplitudy w pozostałej części odpowiedzi impulsowej spadnie poniżej progu 0,005, a jednocześnie maksymalna intensywność generowanej mapy barwnej (reprezentującej wygasającą energię) przyjmie wartość poniżej 0,01. Zastosowanie tych warunków brzegowych pozwala na znaczną redukcję czasu obliczeń, przerywając symulację w fazie, w której w sygnale dominują już jedynie pomijalne energetycznie późne odbicia oraz szum tła.

## 2.4. Moduł auralizacji

W ramach aplikacji opracowano również moduł auralizacji. Miał on umożliwić symulację odsłuchu dźwięku w badanym pomieszczeniu. Wykorzystano w tym celu metodę splotową (FFT convolution) [4]. Można przyjąć, że każde pomieszczenie działa jak system liniowy niezmienniczy w czasie, wobec tego wykonanie splotu dowolnego sygnału z odpowiedzią impulsową pomieszczenia pozwala uzyskać tzw. efekt reverb, czyli dźwięk z pogłosem charakterystycznym dla danego pomieszczenia. Z uwagi na fakt, że zgodnie z teorią sygnałów splot w dziedzinie czasu odpowiada mnożeniu w dziedzinie częstotliwości [5], dokonano transformaty Fouriera algorytmem FFT zarówno dźwięku poddawanemu auralizacji, jak i odpowiedzi impulsowej, a następnie mnożenia tych sygnałów. Następnie przeprowadzono operację odwrotnej transformaty Fouriera, co pozwoliło otrzymać dźwięk z efektem reverb. Schemat przetwarzania sygnałów przedstawiono na Rys. 2.



Rysunek 2: Schemat przetwarzania sygnałów w module auralizacji

Do przetwarzania wykorzystano odpowiednie kombinacje kanałów W i Y, ponieważ dźwięk przygotowano do odsłuchu stereofonicznego, a nie do dedykowanych ambisonicznych systemów odsłuchowych. Kanał W odpowiadał za natężenie dźwięku, a kanał Y za kierunki prawo lewo, zatem dokonując odpowiednich operacji matematycznych uzyskano kanały prawy (W-Y) oraz lewy (W+Y).

### 3. Wyniki

Wynikiem działania głównego modułu aplikacji są kolejne ramki zapisywane do folderu, a także łączone w animację pozwalającą na płynną obserwację zjawisk zachodzących w pomieszczeniu. Najważniejsze dla analizy właściwości akustycznych są pierwsze wygenerowane klatki. Pierwsza ramka, w której można zaobserwować energię akustyczną jest 5. ramką animacji. Czas jaki obejmuje to 8-10 ms. W tym przedziale czasowym do mikrofonu dociera dźwięk bezpośredni oraz odbicie od tylnej ściany. Jest to zgodne z fizycznymi zależnościami – źródło dźwięku znajdowało się w odległości 3 m od mikrofonu, wobec tego dźwięk bezpośredni dotarł do mikrofonu po około 8,7 ms (przyjmując  $343 \frac{m}{s}$  jako wartość prędkości dźwięku w powietrzu), czyli dokładnie w przedziale czasowym odpowiadającym 5. ramce. Wysoka energia w górnej części zdjęcia z prawej strony wskazuje na odbicia od tylnej ściany, co wynika z ustawienia mikrofonu w jej pobliżu. Dźwięk odbity od niej dociera wówczas do mikrofonu w tej samej ramce czasowej, co dźwięk bezpośredni. Ramkę 5. przedstawiono na Rys. 3.



Rysunek 3: Piąta ramka animacji obejmująca przedział 8-10 ms

W module auralizacji wykorzystano dźwięk w formacie .wav oraz zmierzoną odpowiedź impulsową studia. Do dodatkowych testów użyto ogólnodostępnych odpowiedzi impulsowych kościoła, sali koncertowej oraz schronu [6, 7, 8]. W przypadku

pomieszczeń kościoła i sali koncertowej wynikowy plik charakteryzował się silnie pogłosowym brzmieniem w porównaniu do dwóch pozostałych plików. Wskazuje to na poprawne działanie opracowanego modułu.

#### 4. Podsumowanie

Rezultaty projektu pokazują, że z wykorzystaniem technik ambisonicznych można z powodzeniem przeprowadzać wizualizację odbić dźwięku w pomieszczeniach. Opisane w artykule zależności geometryczne umożliwiają mapowanie kierunków docierania dźwięku na obraz sferyczny. Wyniki wskazują na poprawność implementacji. W celu dalszej weryfikacji działania aplikacji należałoby przeprowadzić pomiary w komorze bezechowej. Ponadto planowane jest rozwinięcie bazy danych odpowiedzi impulsowych, co pozwoliłoby na testowanie aplikacji w różnorodnych warunkach oraz rozwój modułu auralizacji. Aplikacja może być wykorzystywana w celu projektowania adaptacji akustycznych w sposób intuicyjny, a także jako pomoc naukowa umożliwiająca zrozumienie zjawisk akustycznych. Ponadto słusznym kierunkiem rozwoju jest podział wyników na konkretne pasma częstotliwościowe, a także wyznaczenie poziomów dźwięku odpowiadających poszczególnym kolorom na zdjęciu, jednak wymagałoby to przeprowadzenia dodatkowych pomiarów.

#### Bibliografia

- [1] Zotter F., Frank M. (2019) *Ambisonics: A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, Springer Nature.
- [2] Arteaga D. (2015) *Introduction to Ambisonics*, Escola Superior Politècnica, Universitat Pompeu Fabra.
- [3] Norma ISO 3382-1:2009, Acoustics — Measurement of room acoustic parameters
- [4] Vorländer M. (2007) *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*, Springer Science & Business Media.
- [5] Szabatin J. (2003) *Przetwarzanie sygnałów*, Warszawa.
- [6] FreeSound, *Impulse Response Church*, <https://freesound.org/people/jmuehlhans/sounds/220752/>, dostęp: 24.03.2026
- [7] Merimaa J., Peltonen T., Lokki T. *Concert Hall Impulse Responses - Pori, Finland*, <http://legacy.spa.aalto.fi/projects/poririrs/>, dostęp: 24.03.2026
- [8] Thornton M. *Free Impulse Responses*, Production Expert, <https://www.production-expert.com/production-expert-1/free-impulse-responses-excellent-for-sound-design-and-post-production>, dostęp: 24.03.2026

# Właściwości akustyczne elastycznych metamateriałów w zależności od stopnia zakrzywienia struktury

*Tytus Nowak, Klara Chojnacka*

*tytnow@student.agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

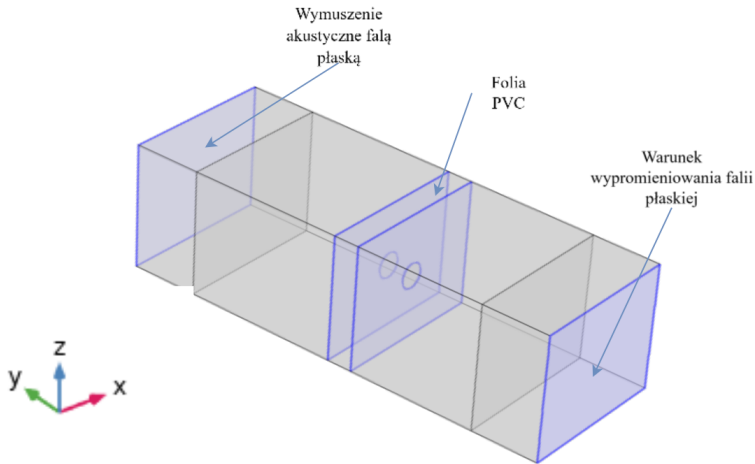
**Abstract** Metamateriały akustyczne to struktury, których właściwości wynikają z odpowiednio zaprojektowanej geometrii i lokalnych rezonansów prowadzących do powstawania pasm zaporowych. W większości dotychczasowych rozwiązań stosuje się panele sztywne, co ogranicza ich wykorzystanie w aplikacjach wymagających podatności mechanicznej i dopasowania do zakrzywionych powierzchni. Elastyczne metamateriały akustyczne stanowią obiecującą alternatywę, jednak wpływ ich deformacji na izolacyjność akustyczną pozostaje słabo rozpoznany. W niniejszym artykule przeanalizowano koncepcję elastycznych metamateriałów akustycznych, łączących zdolność kształtowania pola akustycznego z możliwością mechanicznego przestrajania układu. Przedstawiono wyniki symulacji numerycznych w środowisku COMSOL Multiphysics oraz wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na fizycznym prototypie w komorze pogłosowej. W końcowej części pracy zbadano wpływ stopnia zakrzywienia struktury na jej właściwości akustyczne.

## 1. Wprowadzenie

Izolacyjność akustyczna określa zdolność przegrody do ograniczania transmisji energii fal dźwiękowych pomiędzy sąsiadującymi przestrzeniami. Efektywność klasycznych przegród jest determinowana przede wszystkim przez prawo masy, według którego izolacyjność akustyczna przegrody zależy od jej masy powierzchniowej [1]. Rozwiązania te wykazują jednak istotne ograniczenia w zakresie niskich częstotliwości, gdzie dominują zjawiska rezonansowe, a uzyskanie wysokiej izolacyjności wymagałoby niepraktycznego zwiększenia masy i gabarytów konstrukcji. Odpowiedzią na te ograniczenia są metamateriały akustyczne – projektowane struktury, których właściwości zależą przede wszystkim od ich unikalnej geometrii. Większość metamateriałów akustycznych prezentowanych w literaturze cechuje się wysoką sztywnością, co utrudnia ich implementację w układach wymagających dopasowania struktury do kształtu źródła dźwięku [2, 3]. Rozwiązaniem tego problemu są metamateriały elastyczne. Łączą one precyzyjne kształtowanie pola akustycznego z możliwością mechanicznego przestrajania geometrii, a w określonych konfiguracjach pozwalają również na swobodny przepływ powietrza [4]. W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję metamateriału elastycznego, który składa się z perforowanych folii umieszczonych na dystansie. Opracowano model numeryczny pozwalający na wyznaczenie izolacyjności akustycznej komórki metamateriału, który został zwalidowany w pomiarach laboratoryjnych. Następnie analizie poddano wpływ zaginania struktury na jej skuteczność.

## 2. Model numeryczny metamateriału elastycznego

Model metamateriału akustycznego został zaprojektowany w oprogramowaniu COMSOL Multiphysics (Rys. 1).



Rysunek 1: Wykonany model z wykorzystaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics

Model składa się z dwóch folii wykonanych z materiału PVC (gęstość materiału  $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$ , moduł Younga  $E = 3 \text{ GPa}$ , liczba Poissona  $\nu = 0,4$ ). Wymiary pojedynczej komórki to  $195 \text{ mm} \times 245 \text{ mm}$ . Średnica otworu to  $40 \text{ mm}$ , odległość między płytkami to  $38 \text{ mm}$ , a grubość folii to  $0,8 \text{ mm}$ . Na ściany oraz krawędzie płytek zostały nałożone warunki brzegowe periodyczne, które pozwalają na analizę pojedynczej komórki metamateriału przy założeniu nieskończoności struktury (warunek brzegowy periodic boundary condition) [5]. Na końcach modelu w osi  $y$  zostały określone warunki brzegowe promieniowania fali płaskiej, przy czym ciśnienie padającej fali ustalono na  $1 \text{ Pa}$ . Następnie przeprowadzono symulacje w których obliczano tłumienie przenoszenia (ang. *Transmission Loss*, TL) [dB] danego wzorem

$$TL = 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{1}{n} \sum_n |p_{in}|^2}{\frac{1}{n} \sum_n |p_{out}|^2} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $p_{in}$  – ciśnienie akustyczne w części nadawczej modelu,  $p_{out}$  – ciśnienie akustyczne w części odbiorczej modelu,  $n$  – ilość punktów pomiarowych.

### 3. Pomiary laboratoryjne prototypu

W celu weryfikacji wykonanych symulacji, wykonano prototyp metamateriału. złożono również drewnianą ramkę do zachowania stałej odległości między foliami (Rys. 2a). Pomiary wykonano w oknie pomiarowym o wymiarach  $450 \times 550 \text{ mm}$

w komorze pogłosowej KMiW AGH [6] (Rys. 2b), a izolacyjność akustyczna została obliczona ze wzoru [7] [dB]

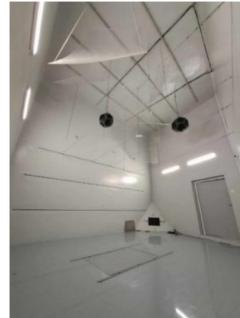
$$R = L_{pnad} - L_{podb} + 10 \log_{10} \left( \frac{S}{A} \right) \quad (2)$$

gdzie:  $L_{pnad}$  – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym [dB],  $L_{podb}$  – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym [dB],  $S$  – pole powierzchni próbki [ $m^2$ ],  $A = 0,161 \frac{V}{T}$  – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej [ $m^2$ ],  $T$  – czas pogłosu w pomieszczeniu odbiorczym [s],  $V$  – objętość pomieszczenia odbiorczego [ $m^3$ ].

a)



b)

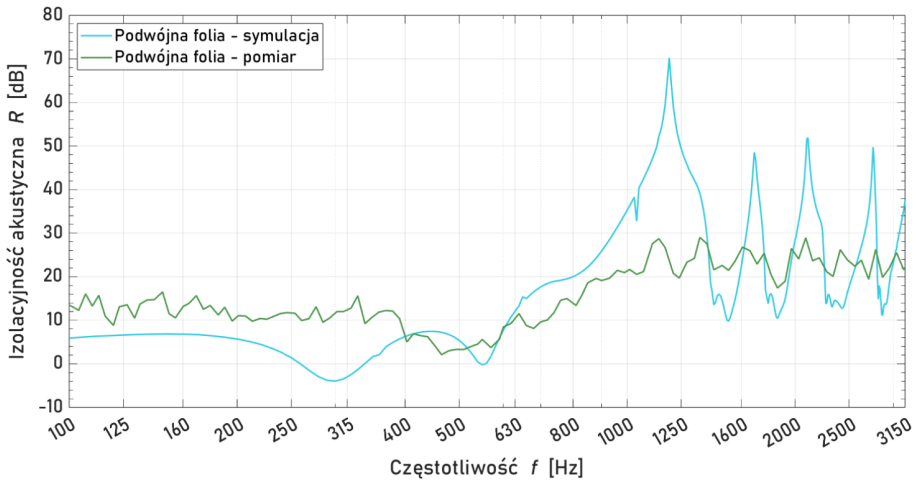


Rysunek 2: a) Prototyp metamateriału elastycznego umieszczony w oknie komory pogłosowej, b) Komora pogłosowa w LAT

Na wykresie przedstawiono wyniki symulacji, wraz z przeprowadzonymi pomiarami (Rys. 3). Ze względu na nieuwzględnienie w modelu skończonych wymiarów próbki oraz niedokładność jej wykonania, wyniki symulacji i pomiarów różnią się szczególnie w zakresie rezonansowego działania struktury powyżej 1000 Hz. Pomimo istotnych rozbieżności w wartościach izolacyjności akustycznej między wynikami eksperymentalnymi a symulacyjnymi, przebiegi krzywych wykazują zbieżną tendencję.

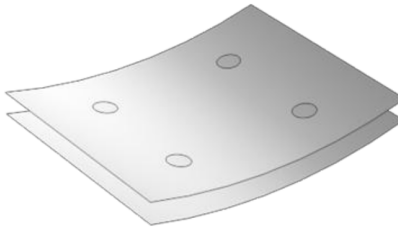
#### 4. Wpływ zmiany kąta zagięcia na właściwości akustyczne metamateriału

Kolejnym krokiem było zbadanie wpływu wygięcia konstrukcji na jej właściwości akustyczne. W tym celu model numeryczny został zaktualizowany poprzez uwzględnienie próbki o skończonych wymiarach, dostosowanych do rozmiarów próbki prototypu (Rys. 4a). W modelu numerycznym analizowano wpływ zmiany kąta  $\alpha$  między dwoma stycznymi do łuku na którym opisana jest próbka (Rys. 4b).

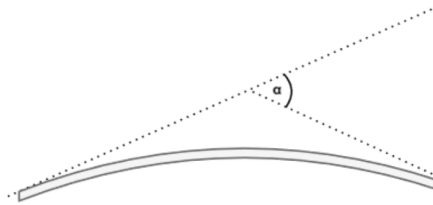


Rysunek 3: Porównanie wyników symulacji do wartości zmierzonych

a)

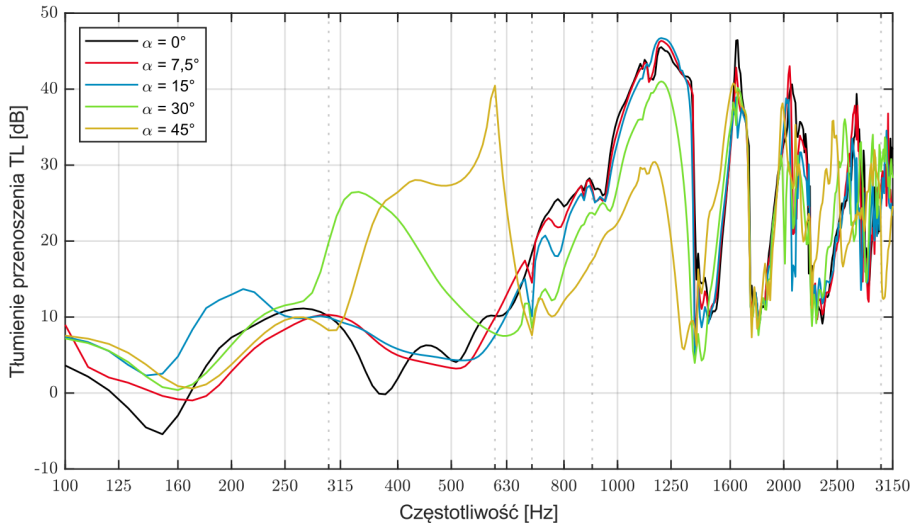


b)

Rysunek 4: a) Model próbki, b) Zaznaczony kąt zakrzywienia  $\alpha$  struktury metamateriału elastycznego

Zrezygowano również z warunków brzegowych periodycznych, aby w symulacjach jak najdokładniej odwzorować fizyczny prototyp. Zamiast nich uwzględniono skończone wymiary próbki. Wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na Rys. 5. Porównano wartości tłumienia przenoszenia dla pięciu wariantów zakrzywienia struktury. Zauważyć można, że wraz ze zwiększeniem kąta zakrzywienia zwiększa się izolacyjność akustyczna próbki dla częstotliwości poniżej 700 Hz, a kształt krzywej zmienia się wraz ze zmianą kąta zagięcia. Dla  $15^\circ$  pierwsze ekstremum lokalne pojawia się dla 160–250 Hz, a dla  $45^\circ$  jest to zakres od 315 do 600 Hz. Wartość pierwszego ekstremum również wzrasta; różnica wartości pierwszego maksimum dla  $0^\circ$  i  $45^\circ$  wynosi ponad 15 dB. Od ok. 700 Hz, wartości tłumienia przenoszenia stabilizują się dla wszystkich konfiguracji, co może wynikać z tego, że charakter działania tej struktury w wysokich częstotliwościach zależy głównie od rezonan-

sów przestrzeni powietrza między foliami i w otworach, co pozostaje niezmiennie między konfiguracjami, a w niższych częstotliwościach (poniżej 1000 Hz) zależy od właściwości materiałowych struktury, które zmieniają się wraz z kątem zagięcia.



Rysunek 5: Wykres tłumienia przenoszenia, dla różnych wartości kąta zakrzywienia struktury

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono propozycję metamateriału elastycznego składającego się z perforowanych folii PVC umieszczonych na dystansie. Konstrukcja ta umożliwia redukcję poziomu ciśnienia akustycznego dla wąsko wybranych częstotliwości. Model numeryczny pozwala na obliczenie wartości tłumienia przenoszenia. W podstawowej formie model zakładał warunki brzegowe periodyczne oraz brak zakrzywienia struktury. Następnie utworzono prototyp metamateriału i wykonano pomiary izolacyjności akustycznej. Zmierzone wartości izolacyjności akustycznej okazały się znacząco mniejsze od wyników symulacji, natomiast krzywe wykazały podobny trend. W kolejnym kroku analizie poddano wpływ zmiany kąta zakrzywienia struktury na tłumienie przenoszenia. Zmieniono również geometrię oraz warunki brzegowe modelu, tak aby wyniki symulacji były bliższe rzeczywistym wartościom. Udowodniono, że wraz ze zmianą kąta zakrzywienia struktury, można stroić metamateriał na dane częstotliwości. W przyszłych pracach zostanie opracowany fizyczny prototyp metamateriału zachowujący stały kąt zakrzywienia struktury i zostaną przeprowadzone pomiary izolacyjności akustycznej dla różnych kątów zakrzywienia struktury.

## Bibliografia

- [1] VÉR I.L., BERANEK L.L., eds. (2005) *Noise and vibration control engineering: principles and applications*, John Wiley & Sons.
- [2] CLAEYS C., et al. (2016) *A lightweight vibro-acoustic metamaterial demonstrator: Numerical and experimental investigation*, Mechanical systems and signal processing, 70, 853–880.
- [3] SUN M., et al. (2020) *Broadband acoustic ventilation barriers*, Physical Review Applied, 13.4, 044028.
- [4] CUI X., et al. (2022) *A flexible meta-curtain for simultaneous soundproofing and ventilation*, Symmetry, 14.11, 2348.
- [5] LANGFELDT F. (2024) *On the validity of periodic boundary conditions for modelling finite plate-type acoustic metamaterials*, The Journal of the Acoustical Society of America, 155.2, 837–845.
- [6] Stanowisko do badania parametrów akustycznych małowabarytowych próbek zwłaszcza izolacyjności akustycznej [Workstand for testing acoustic parameters of small-sized samples, preferably the acoustic insulation properties] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; wynalazca: Tadeusz KAMISIŃSKI, Tomasz Czubak. Int.Cl.: G01N 29/11(2006.01). – Polska. – Opis patentowy; PL219788B1; Udziel. 2014-11-05; Opubl. 2015-07-31. – Zgłosz. nr P.393868 z dn. 2011-02-07.
- [7] PN-EN ISO 10140-2:2021-10. Akustyka – Pomiar laboratoryjny izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 2: Pomiar izolacyjności od dźwięków powietrznych.

# Implementacja i testy algorytmu do akustycznej komunikacji z wykorzystaniem modulacji BFSK

*Julia Sadecka*

*sadecka@student.agh.edu.pl*

AGH w Krakowie

**Abstract** W artykule przedstawiono projekt oraz implementację protokołu komunikacji akustycznej przeznaczonego dla autonomicznego robota podwodnego (AUV). Zaproponowane rozwiązanie bazuje na modulacji BFSK oraz uproszczonej strukturze ramki, inspirowanej protokołem JANUS. Omówiono implementację oraz założenia algorytmu. Przeprowadzono badania eksperymentalne na powierzchni oraz w zamkniętym basenie, analizując wpływ parametrów na skuteczność odbioru danych. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość komunikacji akustycznej.

## 1. Wstęp

Komunikacja w środowisku podwodnym stanowi wyzwanie ze względu na specyficzne właściwości ośrodka jakim jest woda. Propagacja sygnału znacznie różni się od komunikacji w powietrzu, co wiąże się z koniecznością wykorzystania innych metod. W systemach podwodnych najczęściej stosowana jest komunikacja akustyczna, która charakteryzuje się mniejszym tłumieniem sygnału w porównaniu do fal elektromagnetycznych [3].

Celem pracy jest zaprojektowanie, implementacja i testy protokołu komunikacji akustycznej przeznaczonego dla autonomicznego robota podwodnego. W pracy przedstawiono strukturę protokołu, opisano w jaki sposób dane są odbierane oraz odczytywane, a także przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań.

## 2. Przegląd istniejących rozwiązań

Komunikacja akustyczna jest powszechnie stosowana w systemach podwodnych. Jednym z najważniejszych standardów jest protokół JANUS, zatwierdzony przez NATO, który cechuje się dużą odpornością na zakłócenia kosztem niskiej przepustowości [1].

W niniejszej pracy wykorzystano podejście inspirowane JANUS, bazujące na modulacji BFSK oraz uproszczonej strukturze ramki.

Innym podejściem do transmisji danych w podwodnych sieciach akustycznych są prealokowane protokoły dostępu do medium, takie jak zaproponowane przez W. Sun i X. Gao [4] lub AORUN [2]. Protokoły tego typu opierają się na wcześniejszej rezerwacji konkretnego przedziału czasu na przesłanie danych.

### 3. Założenia systemowe i struktura protokołu

#### 3.1. Wymagania systemowe

Celem systemu było umożliwienie transmisji danych pomiarowych z autonomicznego robota podwodnego do stacji odbiorczej. Przesyłane dane obejmują m.in. czas, temperaturę, ciśnienie oraz odległość. System zaprojektowano z myślą o przesyłaniu niewielkich pakietów danych.

#### 3.2. Struktura ramki

Zaprojektowano prostą strukturę ramki zawierającą elementy synchronizacji i weryfikacji danych (Tab. 1). Preambuła (64 bity, „1010...”) umożliwia synchronizację odbiornika. Na końcu dodano sekwencję zer oddzielającą kolejne ramki. Dane kodowane są binarnie (int, float, short), a następnie modulowane za pomocą BFSK.

Tabela 1: Ramka danych

Nazwa	Przykład	Liczba bitów
Preambuła	8x 10101010	64
Czas	192030 (19:20.30)	32
Temperatura	20.3	32
Ciśnienie	1000	16
Dystans	522	16
CRC	Np. 0xA3F2	16
Zakończenie ramki	00000000	8

#### 3.3. Najważniejsze parametry

Jednym z kluczowych elementów wpływających na jakość komunikacji są parametry transmisji. W zaproponowanym rozwiązaniu najistotniejszymi parametrami są: amplituda sygnału, częstotliwość próbkowania, częstotliwość nośna oraz różnica częstotliwości przypisanych do bitów logicznych „0” i „1”.

Częstotliwość próbkowania została ustawiona na poziomie 48 kHz. Częstotliwość nośna wynosiła 6 kHz, natomiast różnica częstotliwości pomiędzy bitami była zmieniana w trakcie badań eksperymentalnych, aby zbadać jej wpływ na skuteczność transmisji. Prędkość transmisji danych została ustalona na poziomie 80 bitów na sekundę.

## 4. Odbiór danych i dekodowanie

Proces odbioru danych rozpoczyna się od rejestracji sygnału akustycznego. Następnie jest on poddawany normalizacji (aby pozbyć się szumów), a w przypadku sygnałów wielokanałowych następuje ich uśrednianie. W następnym kroku jest wykonywana filtracja pasmowa. Jej celem jest ograniczenie sygnału do pasma obejmującego częstotliwości wykorzystane w modulacji BFSK tj. częstotliwość nośną.

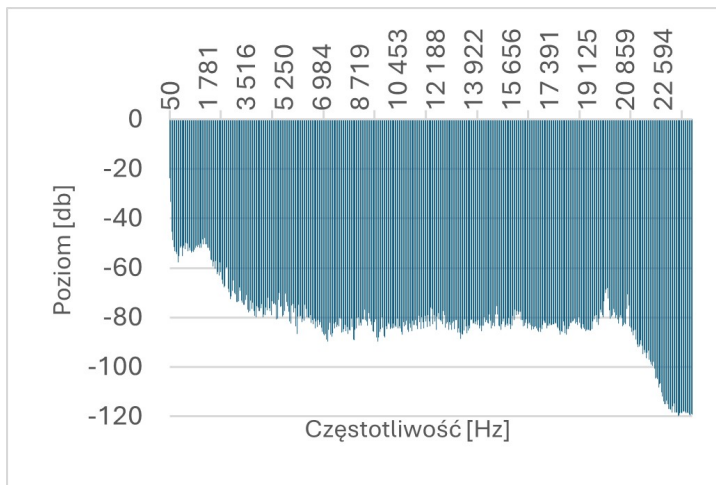
Następnym etapem jest demodulacja BFSK. W klasycznym podejściu zaobserwowano niewystarczającą skuteczność poprawnego odczytu ramek, szczególnie w momencie gdy występowały zakłócenia. Z tego względu zastosowano detekcję korelacyjną, która porównywała odebrany sygnał z sygnałami referencyjnymi odpowiadającymi bitom logicznym „0” i „1”. Kolejnym krokiem było dodanie sprawdzenia wszystkich przesunięć fazowych. Dla każdego takiego przesunięcia generowany był potencjalny ciąg bitów, w którym poszukiwana była preambuła ramki. Taki podejście zwiększyło odporność algorytmu na błędy w odczycie.

Po wykryciu preambuły następowała ekstrakcja ramki danych i jej dekodowanie. Integralność odebranych danych sprawdzana była przy użyciu sumy kontrolnej CRC-16. W przypadku poprawnej weryfikacji CRC ramka uznawana była za poprawnie odebraną, a dane mogły zostać przekazane.

## 5. Przeprowadzone badania i stanowisko pomiarowe

### 5.1. Warunki przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzono w trzech etapach: na powietrzu (laptop–telefon), na powietrzu z docelowym sprzętem oraz w basenie.



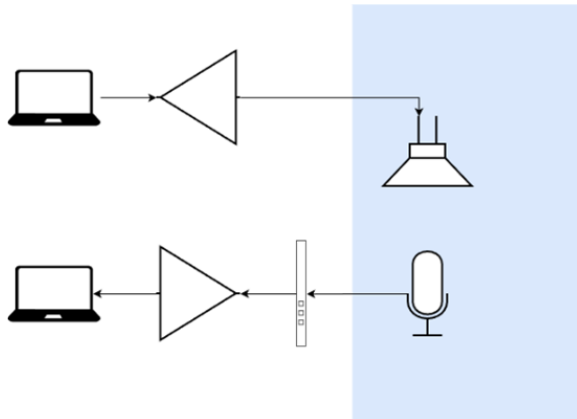
Rysunek 1: Spektrogram szumu na basenie

Środowisko basenowe charakteryzowało się wysokim poziomem szumów i wielodrogowością, co znacząco utrudniało odbiór sygnału. Poziom szumów przedstawia Rys. 1. Widać na nim, że poziom szumów praktycznie we wszystkich częstotliwościach od 2 kHz do 23 kHz przekracza 60 dB. Specyfika tego obiektu wpływa na jakość odbieranego sygnału i utrudnia poprawną demodulację danych.

## 5.2. Stanowisko badawcze

Eksperymenty 2 i 3 przeprowadzono z wykorzystaniem sprzętu pomiarowego, które umożliwia akustyczną transmisję danych pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem w środowisku wodnym.

Po stronie nadawczej, tak jak pokazane jest na Rys. 2, sygnał generowany był w komputerze, a następnie przesyłany do wzmacniacza i głośnika podwodnego (w eksperymencie 3 głośnik był zanurzony w wodzie). Głośnik emitował sygnał akustyczny zgodnie z parametrami opisanymi w Rozdziale 4.



Rysunek 2: Schemat blokowy toru nadawczego i odbiorczego systemu komunikacji akustycznej

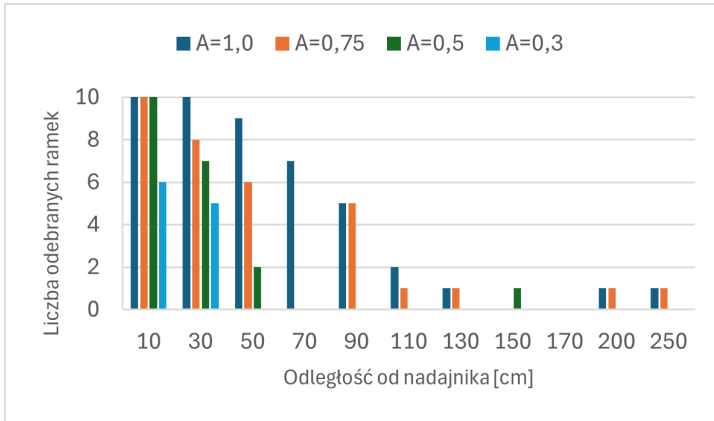
Po stronie odbiorczej sygnał rejestrowany był przez hydrofon, który był połączony z interfejsem audio, następnie wzmacniany i próbkowany za pomocą przetwornika analogowo–cyfrowego. Zarejestrowany sygnał trafiał do komputera, gdzie wykonywane było dalsze przetwarzanie oraz dekodowanie danych.

## 6. Badania

Przeprowadzono szereg badań w celu przetestowania protokołu w różnych konfiguracjach i scenariuszach. Zrobiono to także aby wyłonić najlepsze wartości parametrów. Dla dwóch pierwszych eksperymentów wykonano 10 prób dla każdej odległości. Badania wykonano na powietrzu, z użyciem głośnika i mikrofonu.

### 6.1. Wpływ amplitudy sygnału na skuteczność odbioru

Na Rys. 3 przedstawiono wpływ amplitudy sygnału na procent poprawnie odebranych ramek dla różnych odległości.



Rysunek 3: Liczba poprawnie odebranych ramek w zależności od odległości od nadajnika i amplitudy

Spadek amplitudy powodował pogorszenie skuteczności transmisji, szczególnie dla większych odległości. Dla najwyższej amplitudy ( $A=1,0$ ) możliwy był odbiór nawet powyżej 100 cm, podczas gdy dla niższych wartości transmisja szybko zanikała.

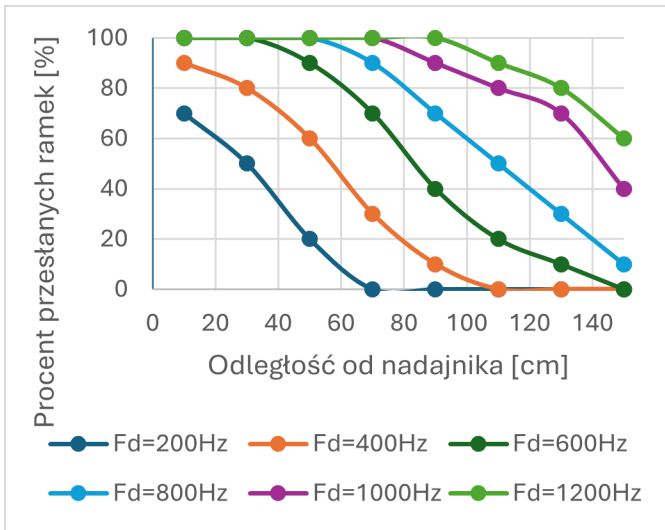
### 6.2. Wpływ różnicy częstotliwości i odległości na skuteczność transmisji

Na Rys. 4 przedstawiono procent poprawnie odebranych ramek w zależności od odległości między nadajnikiem, a odbiornikiem oraz różnicy częstotliwości nośnych odpowiadających bitom logicznym „0” i „1”.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zwiększanie różnicy częstotliwości ( $F_d$ ) istotnie poprawia skuteczność odbioru danych. Widać to szczególnie w miarę zwiększenia się odległości. Dla niewielkich różnic częstotliwości ( $F_d=200$  Hz lub 400 Hz) obserwuje się szybki spadek liczby odebranych ramek, aż do całkowitej utraty transmisji. Może to wynikać z tego, że sygnały odpowiadające bitom „0” i „1” nakładają się na siebie widmowo.

Dla wartości  $F_d \geq 800$  Hz transmisja pozostaje stabilna nawet dla odległości rzędu 100–150 cm.

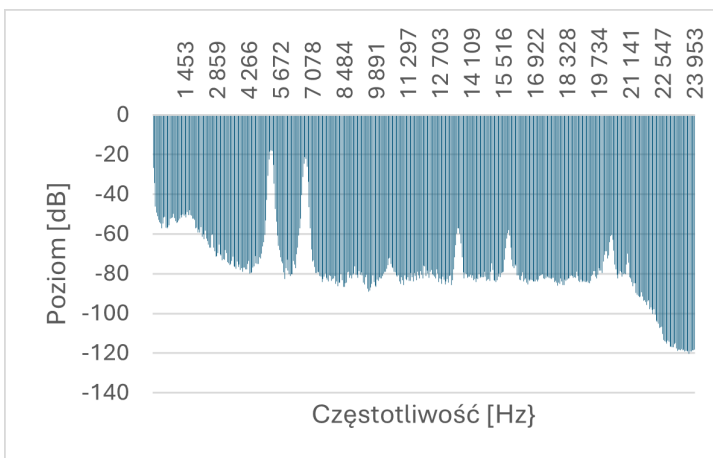
Otrzymane wyniki potwierdzają, że różnica częstotliwości jest jednym z kluczowych parametrów wpływających na niezawodność komunikacji akustycznej. Dzięki temu zwiększa się odporność na zakłócenia.



Rysunek 4: Procent odebranych ramek w zależności od różnicy częstotliwości

### 6.3. Badania w warunkach basenowych

Na Rys. 5 przedstawiono przykładowy spektrogram zarejestrowanego sygnału akustycznego w basenie, na którym widoczne są dwie dominujące składowe częstotliwości odebranego sygnału, o wartościach 5,5 kHz i 6,5 kHz. Pomimo widocznych licznych zakłóceń sygnał użyteczny jest wyraźnie widoczny na tle szumu, co potwierdza możliwości detekcji w analizie.



Rysunek 5: Spektrogram odebranego sygnału w basenie

W opisanych warunkach zaobserwowano jednak niższą skuteczność detekcji ramek w porównaniu do pomiarów wykonanych w środowisku otwartym. Algorytm odbiorczy okazał się również bardziej wrażliwy na dobór parametrów modulacji, w szczególności amplitudy sygnału. Dla amplitudy  $A=0,6$  nie udało się poprawnie zdekodować żadnej ramki. Przy zmianie amplitudy na wartość  $A = 1,0$  udało się odebrać dane z 4 na 10 przeprowadzonych transmisji.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że środowisko basenowe stanowi znacznie trudniejsze medium komunikacyjne niż warunki otwarte, jednak zaproponowane rozwiązanie, przy odpowiednim doborze parametrów, zachowuje częściową funkcjonalność również w takich warunkach.

## 7. Wnioski

W pracy zaprojektowano i zaimplementowano protokół komunikacji akustycznej umożliwiający przesłanie danych pomiarowych z autonomicznego robota podwodnego do stacji odbiorczej. Zastosowanie modulacji BFSK, korelacyjnej metody demodulacji oraz sprawdzenie wszystkich przesunięć fazowych pozwoliło na skuteczną detekcję sygnału nawet w obecności zakłóceń.

Przeprowadzone badania pokazały, że wybranie odpowiednich wartości parametrów transmisji takich jak różnica częstotliwości oraz amplituda sygnału znacząco wpływa na możliwości odbioru danych.

Testy przeprowadzone w warunkach basenowych potwierdziły, że zbiorniki wodne stanowią trudne środowisko komunikacyjne.

Uzyskane wyniki pokazują, że zaproponowany protokół może stanowić podstawę dalszych prac nad komunikacją akustyczną dla środowisk podwodnych. W przyszłości należałoby pomyśleć o rozszerzeniu zasięgu transmisji oraz zwiększeniu odporności na zakłócenia np. poprzez wielokrotne wysyłanie ramek z tymi samymi danymi.

Praca jest realizowana w ramach projektu *Przygotowanie konstrukcji zdalnie sterowanego robota podwodnego ROV do celów inspekcji oraz monitoringu zbiorników pogórnich oraz infrastruktury technicznej* finansowego z programu TURBOgrant Fundacji ORLEN im. Ignacego Łukasiewicza.

## Bibliografia

- [1] Potter J., Alves J., Green D., Zappa G., Nissen I., McCoy K. (2014) *The JANUS underwater communications standard*, Underwater Communications and Networking (UComms), Sestri Levante, Italy, 1–4. doi: 10.1109/UComms.2014.7017134
- [2] Radosevic D., Plate R., Pfetsch M., Neuner B., Chavez J. (2018) *Implementation and testing of JANUS and AORUN acoustic communication algorithms*, OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, Charleston, SC, USA, 1–5. doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604802.

- [3] Theocharidis, Theocharis & Kavallieratou, Ergi-na (2025) Underwater communication technologies: a review. *Telecommunication Systems*. 88. 10.1007/s11235-025-01279-x.
- [4] Sun W., Gao X. (2023) *Pre-allocated MAC Protocol Based on Underwater Acoustic Communication Network*, 8th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Wuxi, China, 935–939. doi: 10.1109/ICSIP57908.2023.10271001

# Pomiar poziomu hałasu impulsowego od broni palnej

*Martyna Stoszek, Przemysław Plaskota*

*m100szek@gmail.com*

Politechnika Wroclawska

**Abstract** Celem pracy było wykonanie pomiarów poziomu hałasu od strzelnicy sportowej z uwzględnieniem narażenia osób zamieszkujących w najbliższym sąsiedztwie oraz użytkowników strzelnicy. Skupiono się przy tym na problemie dokuczliwości dźwięków impulsowych, jakimi są wystrzały z broni palnej. W przypadku hałasu impulsowego obowiązujące w Polsce rozporządzenie dotyczące pomiarów wielkości emisji wymaga stosowania poprawki impulsowej, której wartość jest stała, niezależna od różnic między poszczególnymi źródłami dźwięku z danej kategorii. Z tego powodu zdecydowano się na porównanie używanej obecnie metody z metodą Nordtest, która uzależnia wartość poprawki impulsowej od indywidualnych parametrów impulsu. Badania koncentrują się na hałasie środowiskowym oraz hałasie na stanowisku strzelca i obserwatora. Do pomiarów wykorzystano 7 różnych rodzajów broni oraz dodatkowe urządzenia – tłumik i kompensatory odrzutu. Szczegółowa analiza wszystkich zarejestrowanych wystrzałów umożliwiła porównanie stosowanych metod oceny hałasu impulsowego. Zaobserwowane różnice są związane z odległością od źródła dźwięku – w przypadku hałasu środowiskowego, wartości otrzymane przy użyciu metody Nordtest są mniejsze od tych uzyskanych metodą z rozporządzenia. Z kolei dla pomiarów przeprowadzonych na stanowiskach strzelca i obserwatora występuje odwrotna zależność. Praca wykazuje, że obowiązujące rozporządzenie w dużym stopniu generalizuje impulsy pochodzące od różnych źródeł hałasu, podczas gdy ich parametry potrafią być zupełnie inne. Metoda Nordtest zapewnia bardziej dokładny opis analizowanych zdarzeń akustycznych, zagłębiając się w ich indywidualny charakter. Jest to podstawa do wprowadzenia zmian w polskim prawie w temacie prowadzenia pomiarów hałasu impulsowego.

## 1. Wprowadzenie

Świadomość ryzyka związanego z narażeniem na hałas ogranicza się zazwyczaj do kwestii uszkodzenia narządu słuchu. Oczywiście jest to wystarczający powód, by chronić się przed działaniem niepożądanych dźwięków, jednak generowane przez nie problemy nie są związane wyłącznie z zaburzeniami słuchu. Wzmożona ekspozycja na hałas może prowadzić do wystąpienia m.in. chorób sercowo-naczyniowych, niewydolności serca i nerek czy zaburzeń rozrodczości. Odbija się także na zdrowiu psychicznym – zwiększa poziom stresu, powoduje bezsenność oraz wpływa na koncentrację i pamięć [1]. Z tego powodu istotne jest odpowiednie określenie stopnia dokuczliwości danego rodzaju hałasu. Zupełnie inne wrażenie wywoła bowiem dźwięk generowany przez maszyny, a inne wystrzały z broni palnej, które klasyfikuje się jako hałas impulsowy.

Niniejsza praca koncentruje się na pomiarach poziomu hałasu od strzelnicy sportowej z uwzględnieniem narażenia osób mieszkających w najbliższym sąsiedztwie oraz użytkowników strzelnicy. Porusza ona temat sposobu opisywania dźwięków impulsowych, porównując metody wyznaczania poprawki impulsowej.

## 2. Metody oceny hałasu impulsowego

Obecnie w Polsce oficjalne pomiary hałasu zlecane laboratoriom badawczym wykonywane są w oparciu o rozporządzenie dotyczące prowadzenia pomiarów wiel-

kości emisji [9]. Rozporządzenie to wyznacza dwie metody pomiarów, oddzielając hałas impulsowy od wszystkich innych charakterów dźwięku, gdyż według ekspertów jest on bardziej dokuczliwy od reszty. Jego analiza wymaga zastosowania poprawki impulsowej, która wynika z ogólnego charakteru źródła. Jak mówi norma PN-ISO 1996-2:1999/A1:2002,

*Obecnie nie istnieje opis matematyczny, który jednoznacznie definiuje obecność dźwięku impulsowego bądź umożliwia podział dźwięków impulsowych według [...] podanych kategorii [7].*

Wymienione przez normę kategorie zostały zatem zdefiniowane za pomocą konkretnych przykładów źródeł dźwięku, wyznaczających 3 typy impulsów:

- a) dźwięki o dużej impulsowości, np. wystrzały z broni strzeleckiej, młotkowanie metalu, kucie matrycowe, rozbijanie nawierzchni,
- b) dźwięki impulsowe o dużej energii, np. wybuchy w kopalniach, fale uderzeniowe, ogień broni pancernej, bomby,
- c) typowe dźwięki impulsowe, np. trzask drzwi, gra w piłkę, dzwony kościelne i wszystkie inne dźwięki impulsowe, niebędące ani dźwiękami o dużej impulsowości, ani dźwiękami impulsowymi o dużej energii.

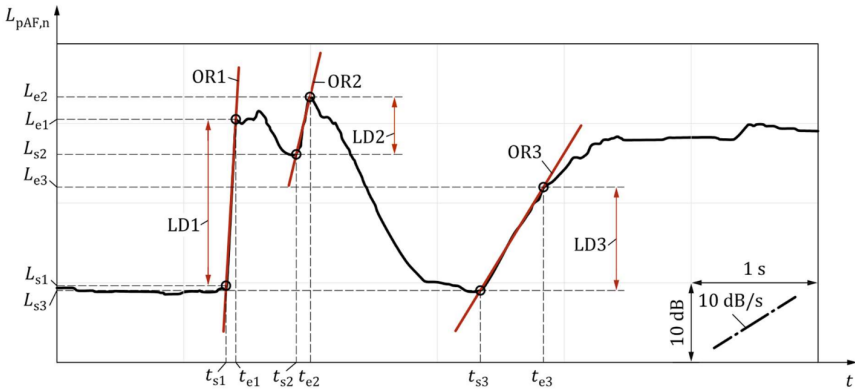
W przypadku dźwięków, które można zidentyfikować i zmierzyć oddzielnie, wartość poprawki impulsowej zmienia się ze względu na kategorię przypisaną impulsowi i jest dodawana do zmierzonego poziomu dźwięku. Dla dźwięków o dużej impulsowości wartość poprawki  $K_I = 12$  dB, a dla typowych dźwięków impulsowych  $K_I = 5$  dB. Z kolei dla dźwięków impulsowych o dużej energii nie określono stałej wartości czy nawet przedziału, w którym mogłaby się ona znaleźć. Norma zaleca jedynie, by przy stosowaniu poziomu dźwięku A poprawka znacznie przewyższała 12 dB (w rozporządzeniu mimo tego jej wartość określono na 12 dB). Wprowadza to dosyć duże niejasności w kwestii oceny impulsów. Poprawki odpowiadające pozostałym kategoriom również są tylko umowne. W rzeczywistości najczęściej zawierają się one w zakresie od 2 dB do 7 dB dla typowych dźwięków impulsowych i od 8 dB do 15 dB dla dźwięków o dużej impulsowości. Norma jednak zapewnia, że wyznaczone średnie wartości zazwyczaj sprawdzają się z dokładnością 3 dB w prowadzonych badaniach naukowych.

Inny sposób wyznaczania poprawki impulsowej został opisany w normie ISO/PAS 1996-3:2022 [2], która kategoryzuje dźwięki impulsowe ze względu na stopień ich słyszalności (z ang. *prominence*). Jej założeniem jest skoncentrowanie się na źródłach impulsowych, które nie należą do żadnej kategorii wymienionej w rozporządzeniu. Przewidywane przez nią poprawki zawierają się w przedziale od 0 dB do 9 dB i mają pozwalać na identyfikację typowych dźwięków impulsowych oraz dźwięków o dużej impulsowości. Od tej drugiej kategorii zostały natomiast oddzielone dźwięki wystrzałów z broni palnej, których charakter określają też czynniki nieobjęte ową normą. Analiza strzałów pod jej kątem może zatem nie dawać w pełni wiarygodnych wyników, ale wciąż dostarcza istotnych informacji, które można wykorzystać w dalszych badaniach.

ISO/PAS 1996-3:2022 korzysta bezpośrednio z procedur opisanych przez metodę Nordtest [3], którą to metodę wybrano do porównania sposobów oceny hałasu impulsowego. Opiera się ona na stwierdzeniu, że dokuczliwość impulsów wzrasta wraz z ich słyszalnością, od której zależy wartość poprawki impulsowej. Słyszalność zaś determinują poszczególne parametry sygnału, określane na podstawie przebiegu czasowego  $L_{AF}$  (Rys. 1), rejestrowanego w interwałach czasowych w przedziale 10–25 ms. Główna analiza skupia się na narastającym zboczach impulsu, którego szybkość narastania musi być większa niż 10 dB/s w całym jego zakresie. Punktem początkowym zbocza jest zatem pierwszy moment, w którym wartość ta zostaje przekroczona, zgodnie ze wzorem

$$\frac{L_{s+1} - L_s}{t_{s+1} - t_s} > 10 \text{ dB/s} \quad (1)$$

gdzie oznaczenie +1 odpowiada kolejnej próbce sygnału.



Rysunek 1: Analiza przebiegu czasowego  $L_{AF}$ :  $L_s$  – poziom w punkcie początkowym narastającego zbocza impulsu,  $L_e$  – poziom w punkcie końcowym narastającego zbocza impulsu,  $t_s$  – punkt początkowy,  $t_e$  – punkt końcowy,  $LD$  – różnica poziomów,  $OR$  – szybkość narastania impulsu. Źródło: NT ACOU 112:2002 [3]

Analogicznie punkt końcowy wiąże się ze spadkiem szybkości narastania poniżej 10 dB/s

$$\frac{L_{e+1} - L_e}{t_{e+1} - t_e} < 10 \text{ dB/s} \quad (2)$$

Jednym z rozważanych parametrów impulsu jest różnica poziomów  $LD$  (z ang. *level difference*) pomiędzy tymi punktami. Dzieląc ją przez czas trwania, w którym występuje, otrzymuje się szybkość narastania impulsu  $OR$  (z ang. *onset rate*). Na tej podstawie oblicza się słyszalność  $P$  impulsu, korzystając z zależności

$$P = 3 \log(OR) + 2 \log(LD) \quad (3)$$

Poprawkę impulsową proponowaną przez metodę Nordtest uwzględnia się tylko wtedy, gdy słyszalność impulsu rzeczywiście zwiększa jego dokuczliwość. Przyjmuje ona wartości

$$K_I = 0 \text{ [dB]} \text{ dla } P \leq 5 \quad (4)$$

$$K_I = 1,8 \cdot (P - 5) \text{ [dB]} \text{ dla } P > 5$$

Zależności (1)–(4) zostały zaczerpnięte z NT ACOU 112:2002 [3].

### 3. Warunki pomiarowe

Wybrana strzelnica dysponuje jedną osią strzelecką o długości 100 m. Wyznaczono na niej 3 stanowiska strzeleckie, do których przypisano następujące rodzaje broni:

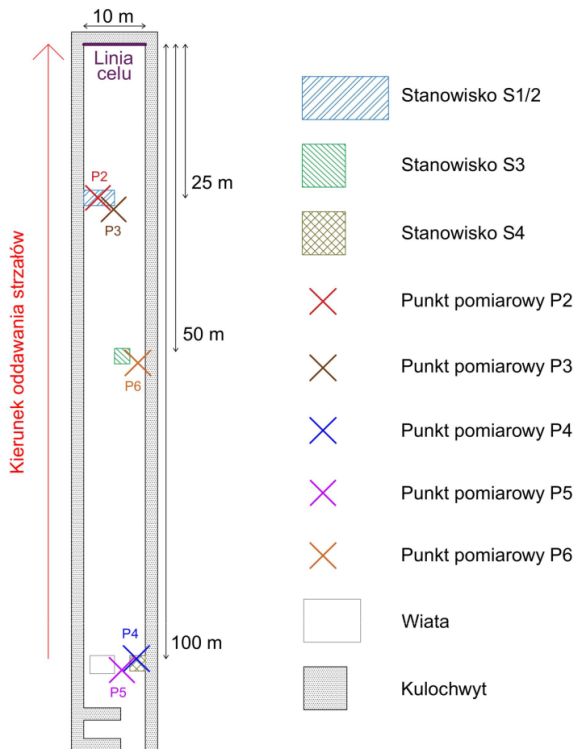
- dla stanowiska S1/2: pistolet CZ P-09 Compact Nocturne, pistolet CZ P-09 Kadet, strzelbę Kral Arms K12, strzelbę Maverick Mossberg 88,
- dla stanowiska S3: karabin AK-47, karabin SVRN PAC15 Gen 3,
- dla stanowiska S4: karabin wyborowy Tikka T3x A1.



Rysunek 2: Położenie punktu pomiarowego P1 względem stanowisk S1/2, S3 i S4. Źródło: Geoportal Infrastruktury Informacji Przestrzennej [dostęp: czerwiec–grudzień 2025 r.]

W dalszej części pracy wymienione bronie określa się kolejno jako: Nocturne, Kadet, K12, Maverick 88, AK-47, PAC15, Tikka. W przypadku karabinu Tikka dodatkowo uwzględniono konfiguracje z zamontowanym kompensatorem odrzutu oraz z zamontowanym tłumikiem.

Pomiary hałasu środowiskowego wykonano w oparciu o załącznik nr 8 do obowiązującego rozporządzenia [9]. Wyznaczono punkt pomiarowy P1, znajdujący się na granicy najbliższego terenu zabudowy mieszkaniowej, oddalony od stanowisk S1/2, S3 i S4 kolejno o ok. 1164 m, 1170 m i 1182 m (Rys. 2). Na podstawie wymagań dotyczących urządzeń pomiarowych zawartych w normie PN-ISO 10843:2002 [8] do pomiarów wykorzystano miernik poziomu dźwięku klasy pierwszej.



Rysunek 3: Plan strzelnicy sportowo-rekreacyjnej, na której wykonano pomiary, z rozmieszczeniem punktów pomiarowych P2–P6

Pomiary hałasu na stanowiskach strzelca i obserwatora wykonano w oparciu o normę PN-EN ISO 17201-6:2022-11 [5]. W przypadku pomiarów na stanowisku strzelca, ze względu na brak możliwości zdalnego operowania bronią, punkty pomiarowe P2 oraz P4 umieszczono w odległości 20 cm od bardziej narażonego na działanie hałasu ucha strzelca. Punkty pomiarowe P3, P5 i P6 zlokalizowano na podstawie przeciętnego ustawienia obserwatora w trakcie oddawania strzałów, tj. w odległości ok. 3 m od strzelca. W oparciu o stosowaną metodykę wykorzystano

miernik poziomu dźwięku klasy pierwszej z mikrofonem 1/4" przeznaczonym do pracy z wysokimi poziomami dźwięku.

Lokalizację punktów pomiarowych na terenie strzelnicy przedstawiono na Rys. 3.

#### 4. Metoda obliczeniowa

Analizę wyników przeprowadzono za pomocą oprogramowania opracowanego przez producenta miernika. W pierwszej kolejności metodą próbkowania wyznaczono poziom tła akustycznego, który wyniósł  $L_{Aeq} = 35,3$  dB. Biorąc pod uwagę 10-decybelowy spadek poziomu ciśnienia akustycznego względem wartości szczytowej, dla każdego zarejestrowanego impulsu obliczono jego czas trwania. Ze względu na relatywnie duży krok loggera rezultaty odbiegają od rzeczywistych czasów trwania impulsów strzałów z broni palnej, które przybierają wartości zaledwie kilku milisekund [11]. Następnie wyznaczono równoważny poziom dźwięku za czas trwania zdarzenia akustycznego, porównano z poziomem tła i w razie potrzeby skorygowano wynik odpowiednią wartością poprawki środowiskowej  $K_1$ .

Ostateczne wynikowe równoważne poziomy dźwięku otrzymano po dodaniu poprawki impulsowej według wzoru [6]

$$L_{Req,t} = L_{Aeq,t} - K_1 + K_I \quad (5)$$

W każdym przypadku zbadano 2 warianty:

- a) według metody z rozporządzenia zastosowano poprawkę  $K_I = 12$  dB,
- b) według metody Nordtest zastosowano poprawkę  $K_I$ , wyznaczoną na podstawie parametrów  $OR$  oraz  $LD$ .

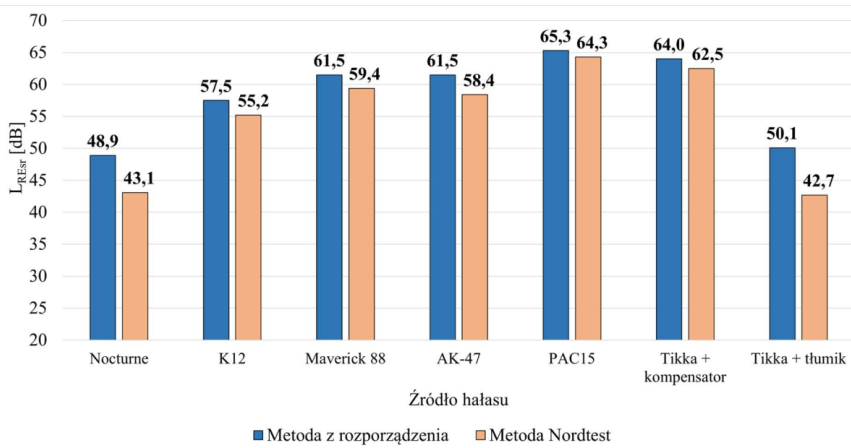
Następnie wyznaczono wynikowe ekspozycyjne poziomy dźwięku za pomocą zależności

$$L_{RE} = L_{Req,t} + 10 \log \left( \frac{t}{t_0} \right) \quad (6)$$

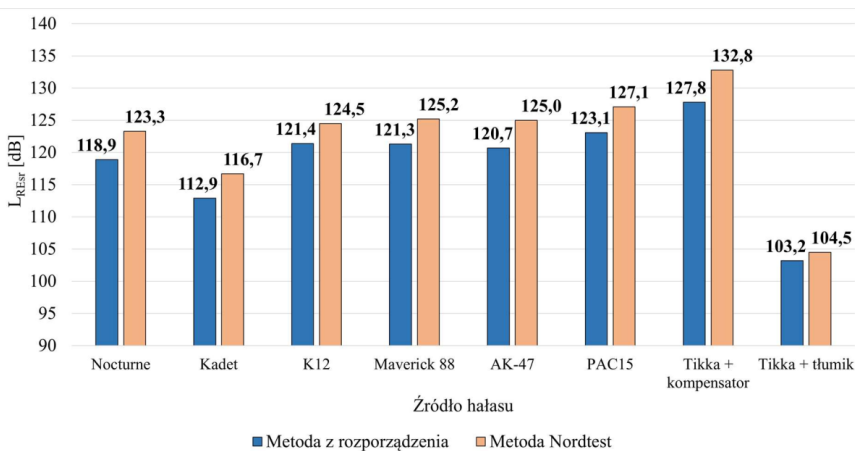
gdzie:  $t_0$  – czas odniesienia równy 1 s,  $t$  – czas trwania impulsu [4], oraz uśredniono je energetycznie dla poszczególnych rodzajów broni.

#### 5. Wyniki

Na Rys. 4 – 6, kolejno dla hałasu środowiskowego, hałasu na stanowisku obserwatora i hałasu na stanowisku strzelca, przedstawiono zestawienie średnich wartości  $L_{RE}$  dla poszczególnych rodzajów broni. Zobrazowano jednocześnie rozbieżność wyników pomiędzy dwiema analizowanymi metodami wyznaczania poprawki impulsowej. W przypadku hałasu środowiskowego nie wzięto pod uwagę pomiarów wykonanych podczas oddawania strzałów z pistoletu Kadet, ponieważ większości rozważanych sygnałów nie można było zakwalifikować jako impulsy ze względu na niewystarczające różnice poziomów dźwięku w stosunku do poziomu tła akustycznego.

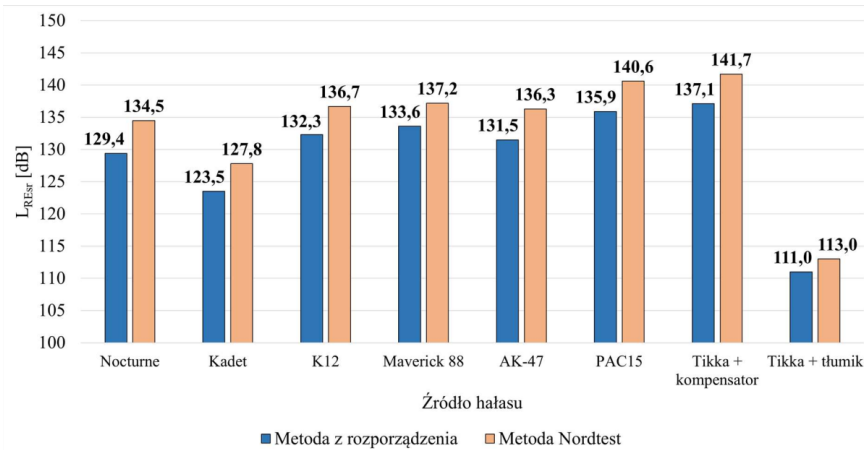


Rysunek 4: Hałas środowiskowy – poziomy  $L_{REsr}$  dla poszczególnych rodzajów broni, wyniki rozróżniono ze względu na zastosowaną poprawkę impulsową



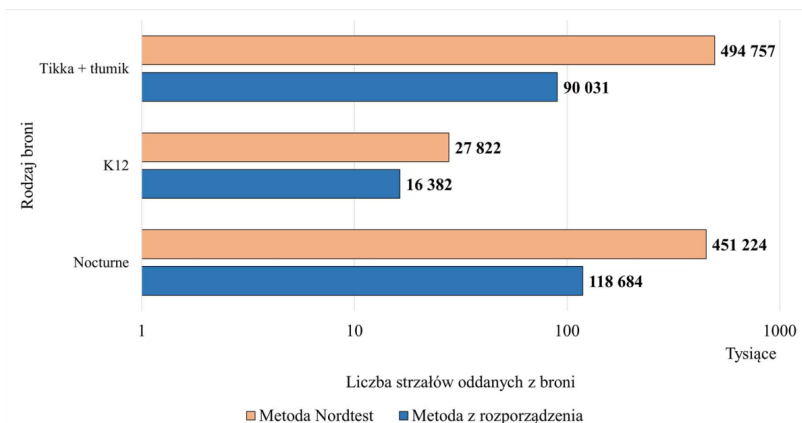
Rysunek 5: Hałas na stanowisku obserwatora – poziomy  $L_{REsr}$  dla poszczególnych rodzajów broni, wyniki rozróżniono ze względu na zastosowaną poprawkę impulsową

Dla hałasu w środowisku wartości uzyskane poprzez zastosowanie metody Nordtest dla każdego przypadku są mniejsze od tych wyznaczonych za pomocą metody z rozporządzenia. Z kolei przy pomiarach wykonywanych na terenie strzelnicy zależność ta jest odwrotna. Odległość od źródła dźwięku jest tutaj kluczowym czynnikiem determinującym parametry impulsów. Oprócz tego na ich charakter znacząco wpływa rodzaj wykorzystywanej broni, a różnice można zauważyć także pomiędzy poszczególnymi strzałami. Rozporządzenie, w przeciwieństwie do metody Nordtest, nie uwzględnia żadnej z tych zmiennych w ocenie hałasu impulsowego.

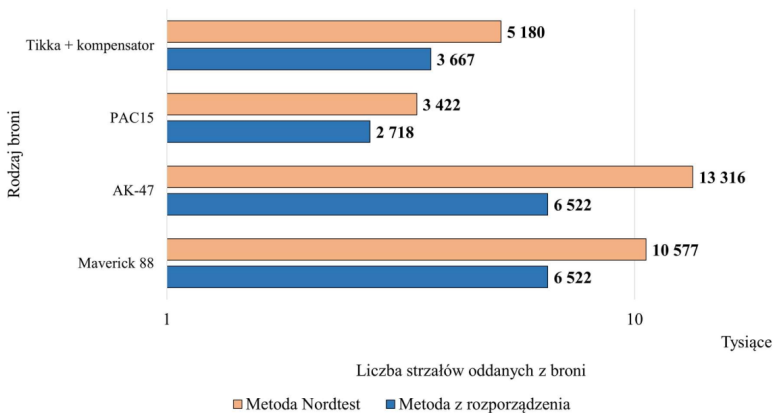


Rysunek 6: Hałas na stanowisku strzelca – poziomy  $L_{REsr}$  dla poszczególnych rodzajów broni, wyniki rozróżniono ze względu na zastosowaną poprawkę impulsową

Zaobserwowane rozbieżności przekładają się bezpośrednio na kwestię dopuszczalnych poziomów hałasu. Na podstawie otrzymanych wyników określono maksymalną liczbę strzałów, jaką można oddać z każdej broni, aby przy tym nie przekroczyć  $L_{Aeq,D} = 55$  dB, tj. dla dopuszczalnego poziomu określonego w rozporządzeniu dla terenów zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej [10]. Rys. 7–8 pokazują, jak drastycznie metoda wyznaczania poprawki impulsowej może ograniczyć możliwości strzelnicy.



Rysunek 7: Hałas środowiskowy – maksymalna liczba strzałów, jaką można oddać z poszczególnych rodzajów broni, nie przekraczając przy tym dopuszczalnego poziomu hałasu  $L_{Aeq,D} = 55$  dB; wyniki rozróżniono ze względu na zastosowaną poprawkę impulsową (Tikka + tłumik, K12, Nocturne)



Rysunek 8: Hałas środowiskowy – maksymalna liczba strzałów, jaką można oddać z poszczególnych rodzajów broni, nie przekraczając przy tym dopuszczalnego poziomu hałasu  $L_{Aeq,D} = 55$  dB; wyniki rozrózniono ze względu na zastosowaną poprawkę impulsową (Tikka + kompensator, PAC15, AK-47, Maverick 88)

## 6. Wnioski

Pomimo stosowania się do obowiązującego prawa, ocena hałasu impulsowego w Polsce jest przeprowadzana nieadekwatnie do charakteru poszczególnych zdarzeń akustycznych. Metodyka generalizuje duże grupy źródeł dźwięku, więc tym bardziej nie skupia się na różnicach występujących pomiędzy pojedynczymi przypadkami. Nie bierze również pod uwagę wpływu odległości, na której wykonywane są pomiary, a która jest istotnym czynnikiem, jeśli chodzi o propagację dźwięku. Z tego powodu należałoby zmienić podejście prezentowane w rozporządzeniu i oprzeć się na metodach zagłębiających się w parametry zdarzeń akustycznych, w czym mogłoby pomóc zakończenie prac nad normą ISO/PAS 1996-3:2022.

## Bibliografia

- [1] Acoustic Course for Industry [dostęp: 10.12.2025 r.] Dostęp pod adresem: <https://aci.acoucou.org/>
- [2] ISO/PAS 1996-3:2022. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 3: Objective method for the measurement of prominence of impulsive sounds and for adjustment of  $L_{Aeq}$ .
- [3] NT ACOU 112:2002. Acoustics – Prominence of impulsive sounds and for adjustment of  $L_{Aeq}$ .
- [4] PN-EN 61672-1:2014-03. Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania.

- [5] PN-EN ISO 17201-6:2022-11. Akustyka – Hałas dochodzący ze strzelnic – Część 6: Pomiary ciśnienia akustycznego w pobliżu źródła w celu określenia narażenia na dźwięk.
- [6] PN-ISO 1996-1:2006. Akustyka – Opis, pomiary i ocena hałasu środowiskowego – Część 1: Wielkości podstawowe i procedury oceny.
- [7] PN-ISO 1996-2:1999/A1:2002. Akustyka – Opis i pomiary hałasu środowiskowego – Zbieranie danych dotyczących sposobu zagospodarowania terenu.
- [8] PN-ISO 10843:2002. Akustyka – Metody opisu i pomiaru pojedynczych impulsów lub serii impulsów.
- [9] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z 7 września 2021 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji (Dz.U. 2021 poz. 1710).
- [10] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz.U. 2014 poz. 112 t.j., załącznik 1).
- [11] Konopka W. i in. (2002) *Ocena i analiza środowiska akustycznego u żołnierzy narażonych na hałas impulsowy*, *Medycyna Pracy*, 53 (5), 391–396.

## Modelowanie toru hydroakustycznego oraz estymacja kierunku źródła dźwięku

Zofia Szymczykowska, Emilia Szewczyk, Ryszard Olszewski

zofiasz@student.agh.edu.pl, Emis@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

**Abstract** Praca dotyczy zagadnienia modelowania toru hydroakustycznego oraz algorytmu estymacji kierunku fali akustycznej, z którego dociera ona do robota w środowisku podwodnym. Celem pracy jest wstępna walidacja modelu i metody lokalizacji źródła dźwięku w ramach projektu robota podwodnego rozwijanego w Studenckim Kole Naukowym *AGH Marines*.

Opracowano model toru hydroakustycznego w środowisku MATLAB/Simulink. Uwzględnia on wybrane rzeczywiste zjawiska takie jak szумы środowiska wodnego i układów elektronicznych, filtrację oraz kwantyzację. W celu estymacji kierunku, z którego dociera fala akustyczna do hydrofonów, stosuje się metodę opartą na analizie różnic czasów przybycia (ang. *TDOA – Time Difference of Arrival*), wyznaczaną na podstawie korelacji wzajemnej sygnałów zarejestrowanych przez układ przetworników.

Przeprowadzone pierwsze badania symulacyjne wskazują na poprawność identyfikacji kierunku źródła dźwięku. Praca stanowi etap wstępny i jest rozwijana w celu uwzględniania bardziej złożonych zjawisk akustycznych takich jak, na przykład, wielokierunkowość propagacji sygnałów, a także w zakresie testowania oraz optymalizowania alternatywnych algorytmów lokalizacyjnych oraz geometrii układu hydrofonów.

### 1. Wprowadzenie

Wyznaczanie położenia źródeł dźwięku w środowisku wodnym jest złożonym zagadnieniem ze względu na własności tego ośrodka. Propagacja fal akustycznych w wodzie silnie zależy od parametrów takich jak: temperatura, zasolenie czy głębokość. Dodatkowo, w akwenach zamkniętych, występują zjawiska interferencji fal odbitych od powierzchni wody, brzegu oraz dna (wielokierunkowość propagacji fali akustycznej). Sygnały rejestrowane przez hydrofony są mocno obciążone poziomem szumów wynikających z między innymi: turbulencji wody w pobliżu przetworników, hałasu termicznego (istotnego zwłaszcza przy wysokich częstotliwościach), hałasu powierzchniowego, pracy instalacji technicznych czy pędników robota podwodnego [1].

Z uwagi na czasochłonność badań w warunkach rzeczywistych, dokładne modelowanie torów hydroakustycznych jest niezbędne do oceny skuteczności algorytmów lokalizacji podwodnej, a także pozwala na testowanie różnych konfiguracji geometrii układu hydrofonów.

### 2. Tor hydroakustyczny

Opracowany model toru hydroakustycznego stanowi podstawę do testowania i optymalizowania algorytmów lokalizacji źródła dźwięku, w szczególności tych opartych na analizie różnic czasów dotarcia sygnału (ang. *TDOA – Time Difference of Arrival*), oraz różnych układów geometrii hydrofonów. W celu prowadzenia badań w sposób powtarzalny opracowano środowisko symulacyjne w programie MATLAB/Simulink.

Model składa się z dwóch głównych części: skryptu MATLAB generującego sygnały wejściowe oraz toru symulacyjnego w programie Simulink, odpowiedzialnego za dalsze przetwarzanie sygnału będące przybliżeniem warunków pracy fizycznego układu pomiarowego.

### 2.1. Generowanie sygnałów

W pierwszym etapie definiowany jest sygnał źródłowy - krótkotrwały impuls sinusoidalny o zadanej częstotliwości i czasie trwania, wraz z przyjętymi parametrami próbkowania. Przyjęto, że fala akustyczna propaguje się w postaci fali płaskiej. Następnie projektowana jest geometria układu hydrofonów – do wstępnej fazy testów założono rozmieszczenie przetworników na planie trójkąta równobocznego, w znanej odległości  $L$  między sobą. Takie ułożenie pozwala jednoznacznie wyznaczyć kierunek sygnału dźwiękowego, w przeciwieństwie do układu, w którym hydrofony ułożone są w jednej linii [2].

Prędkość dźwięku w wodzie nie jest stałą wielkością – zależy ona od parametrów takich jak temperatura, zasolenie i ciśnienie hydrostatyczne (głębokość). Skrypt pozwala na jej dynamiczne wyznaczenie na podstawie empirycznego wzoru Leroya [1]

$$c = 1492,9 + 3(t - 10) - 6 \cdot 10^{-3}(t - 10)^2 - 4 \cdot 10^{-2}(t - 18)^2 + 1,2(s - 35) - 1 \cdot 10^{-2}(t - 18)(s - 35) + \frac{h}{81} \quad (1)$$

gdzie:  $c$  – prędkość dźwięku [m/s],  $t$  – temperatura [°C],  $s$  – zasolenie [ppt],  $h$  – głębokość [m].

Kolejnym elementem skryptu jest obliczanie opóźnień w dotarciu sygnału do poszczególnych hydrofonów według następującej zależności

$$\tau_i = \frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{k}}{c} \quad (2)$$

gdzie:  $\mathbf{r}_i$  – wektor położenia  $i$ -tego hydrofonu,  $\mathbf{k} = [\cos \theta, \sin \theta]$  – jednostkowy wektor kierunku propagacji fali pod kątem  $\theta$ ,  $c$  – prędkość dźwięku w wodzie.

Dzięki obliczonym w ten sposób opóźnieniom modelowane są sygnały docierające do hydrofonów – sygnał źródłowy przesuwany jest o odpowiednią liczbę próbek. Otrzymaną w ten sposób macierz zapisuje się do pliku, który jest wczytywany przez dalsze segmenty toru w środowisku Simulink.

### 2.2. Symulacja w środowisku Simulink

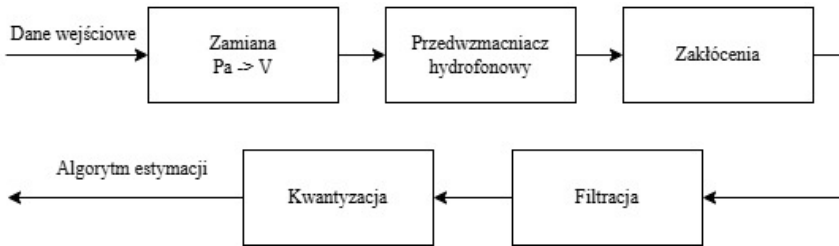
W symulacji uwzględniono wybrane, podstawowe elementy toru przetwarzania sygnału odpowiadające rzeczywistym układom elektronicznym – pozwala to na uzyskanie danych symulacyjnych lepiej odzwierciedlających rzeczywiste sygnały.

Przyjęty model dzieli się na poszczególne sekcje:

- Zamiana sygnału akustycznego na sygnał napięciowy – odwzorowuje działanie przetwornika, który przekształca zmiany ciśnienia akustycznego w zmienne napięcie elektryczne.

- Wzmocnienie – symuluje działanie przedwzmacniacza hydrofonowego.
- Zaszumienie sygnału – szum biały wprowadza zakłócenia imitujące zarówno szумы środowiska wodnego jak i układów elektronicznych.
- Filtracja – filtr pasmowo-przepustowy pozostawia jedynie użyteczną część odbieranego sygnału wokół odbieranej częstotliwości.
- Ograniczenie amplitudy i kwantyzacja – odwzorowują działanie przetworników analogowo-cyfrowych, poprzez dyskretyzację sygnału w dziedzinie amplitudy i czasu.

Rys. 1 przedstawia koncepcyjny schemat toru symulacyjnego.



Rysunek 1: Schemat koncepcyjny toru symulacyjnego w środowisku Simulink

Tak zaprojektowany model stanowi wstępne narzędzie umożliwiające przeprowadzenie prostych symulacji i testów algorytmów lokalizacji źródła dźwięku.

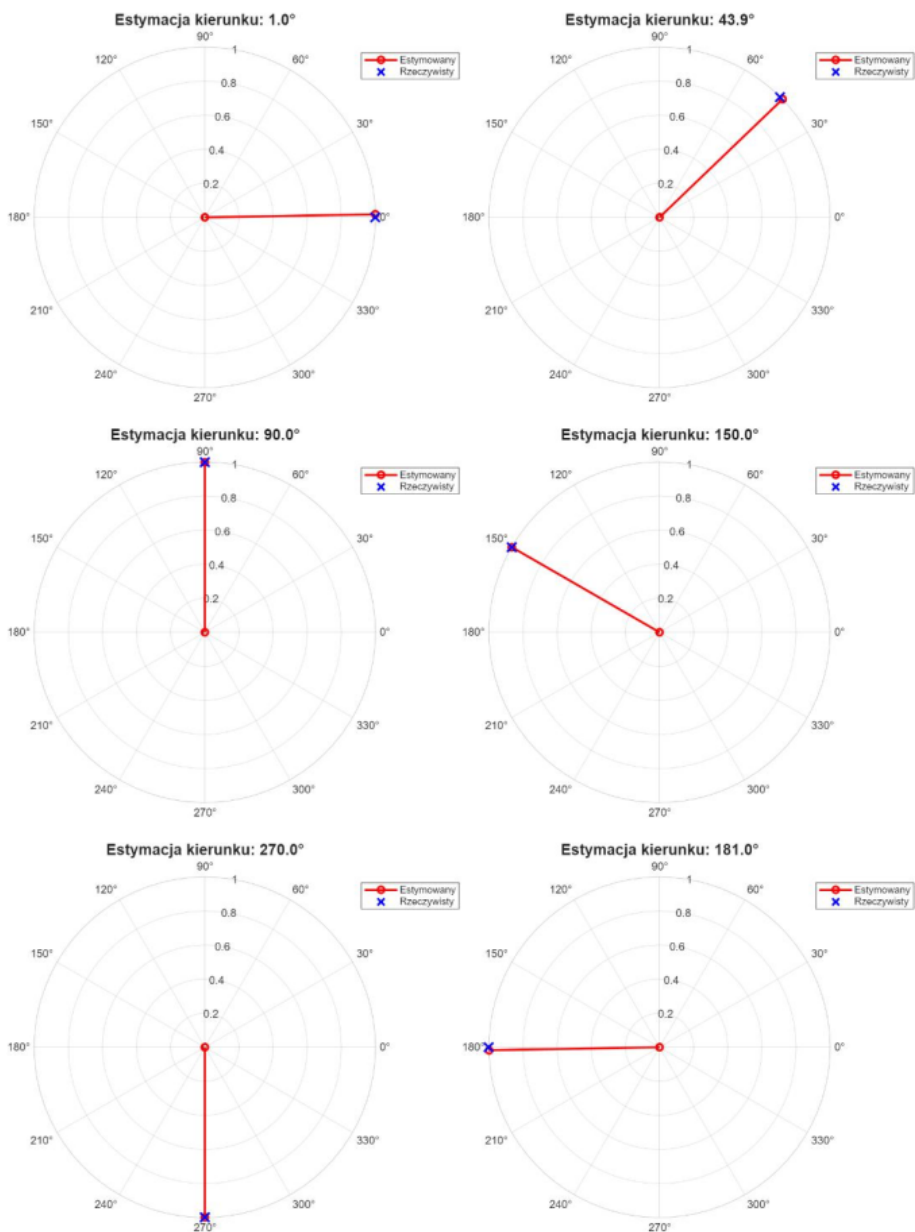
### 3. Estymacja kierunku źródła dźwięku – wyznaczenie korelacji między sygnałami

Dane uzyskane w symulacji, po przejściu przez tor hydroakustyczny, wykorzystano do estymacji kąta przybycia sygnału. W rzeczywistych warunkach, sygnały mogą być bardziej zanieczyszczone szumami oraz innymi sygnałami odbitymi. Z tego powodu bardziej precyzyjną metodą niż porównywanie natężenia dźwięku jest wyznaczenie różnic czasów przybycia sygnałów do każdego z hydrofonów.

Za pomocą przesuwania sygnałów względem siebie, szukano maksimum funkcji korelacji wzajemnej [4]

$$R_{x_1 x_2}(x) = \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n]x_2[n+x] \quad (3)$$

W momencie gdy obie fale najbardziej nakładają się na siebie, funkcja osiąga wartość maksymalną. W przypadku układu składającego się z trzech hydrofonów wyznaczono dwa przesunięcia między sygnałami. Następnie, znając częstotliwość próbkowania, obliczono różnice czasu przybycia sygnału do odbiorników.



Rysunek 2: Estymowane kierunki źródła dźwięku dla wybranych kątów: a) 0°, b) 45°, c) 90°, d) 150°, e) 180°, f) 270°.

Poszczególne czasy były liczone względem czasu nadejścia fali do pierwszego z hydrofonów. Wyznaczono fizyczną różnicę dróg między hydrofonami zgodnie ze wzorem

$$\Delta r = \Delta t \cdot v \quad (4)$$

Różnica ta jest rzutem wektora łączącego hydrofony  $i$  oraz  $j$  na szukany wektor kierunkowy fali

$$\Delta r_{ij} = (x_i - x_j) \cdot \cos \theta + (y_i - y_j) \cdot \sin \theta \quad (5)$$

Znając położenia hydrofonów względem siebie, opóźnienia w dotarciu oraz prędkość dźwięku w wodzie otrzymano więcej danych niż szukanych parametrów wektora kierunkowego źródła sygnału. Dlatego w celu wyznaczenia niewiadomych zastosowano metodę najmniejszych kwadratów do rozwiązania układu równań. Pozwoliło to zminimalizować wpływ szumów oraz błędów na ostateczny wynik.

## 4. Wyniki symulacji

Rys. 2 przedstawia wyniki wstępnych testów symulacyjnych dla wybranych kątów nadejścia fali akustycznej:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ .

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje pozwalają zweryfikować poprawność techniki lokalizacji źródła dźwięku przed zastosowaniem jej w poruszającym się pod wodą robocie. Dzięki modelowi możliwe jest także badanie wpływu parametrów nadawanej fali akustycznej oraz zaszumienia sygnału na jakość wyników. Opracowane rozwiązania zostaną przeniesione do rzeczywistych układów, następnie przetestowane w próbach basenowych, a w konsekwencji w warunkach naturalnego zbiornika wodnego.

Praca jest realizowana w ramach projektu *Przygotowanie konstrukcji zdalnie sterowanego robota podwodnego ROV do celów inspekcji oraz monitoringu zbiorników pogórnictwa oraz infrastruktury technicznej* finansowego z programu TURBOgrant Fundacji ORLEN im. Ignacego Łukasiewicza.

## Bibliografia

- [1] Marage J.-P., Mori, Y. (2010) *Sonar and underwater acoustics*, London: ISTE Ltd.
- [2] Baron V., Finez A., Bouley S., Fayet F., Mars J.I., Nicolas B. (2021) *Hydrophone array optimization, conception, and validation for localization of acoustic sources in deepsea mining*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 46(2), 555–563.
- [3] Waite A.D. (2002) *Sonar for practising engineers*, Wiley.
- [4] [https://home.agh.edu.pl/~dwornik/2023\\_IAD\\_TSD/TSD\\_03\\_Korelacja.pdf](https://home.agh.edu.pl/~dwornik/2023_IAD_TSD/TSD_03_Korelacja.pdf) (odwiedzono 23.03.2026r.)



## Indeks autorów

Andruskho O., 45

Batko W., 5

Bekus D., 45

Bębenkowski T., 45

Borkowski P., 7

Bydłosz P., 31

Chmielińska M., 45

Chojnacka K., 9, 48, 67

Chojnacki B., 11

Czesak K., 13

Dąbrowski I., 30

Delekta R.J., 15

Drzewiecki Sz., 45

Flach A., 17

Gajewska K., 45

Gurgul M., 18

Hamrani Ch., 20

Hołowiej G., 46, 55

Jabłoński A., 5

Jankowska W., 47, 61

Jasiński J., 18, 25

Jasiński M., 47, 61

Kamisiński T., 22

Kleczkowski P., 13

Kocha M., 45

Korzeniak B., 45

Kosała K., 17

Książek P., 24

Kucejko M., 25

Kucharski A., 7

Ledwoń K., 26

Libal U., 24

Loch B., 45

Machura D., 45

Maciejewska H., 45

Madej Z., 28, 40

Małecki P., 30

Marchacz M., 45

Matyjewski M., 30

Mleczko D., 31

Nowak T., 48, 67

Nowoświat A., 33

Olszewski R., 52, 91

Ozga A., 20

Paszkowski W., 26

Perz R., 30

Plaskota P., 50, 81

Pluta M., 18, 25, 34

Pruchnicki P., 46, 55

Rubacha J., 36

Rusinek R., 7

Sadecka J., 49, 73

Skrzyp J., 45

Stoszek M., 50, 81

Szewczyk E., 52, 91

Szymański M., 7

Szymczykowska Z., 52, 91

Trojanowski R., 34, 37

Węgrzyn F., 38

Wiciak J., 37

Wszolek W., 40

Wójcik A., 39, 40

Zablotni R., 7

## Organizatorzy



Polskie Towarzystwo Akustyczne  
Oddział w Krakowie



Katedra Mechaniki i Wibroakustyki AGH



**Komitet  
Akustyki**

Komitet Akustyki PAN

## Sponsorzy

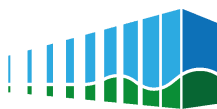


International Commission for Acoustics



**walraven**

Walraven Sp. z o.o.



***EPUFLOOR***

*AKUSTYKA*

Epufloor Sp. z o.o.