
XXVII 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
08 – 11 KWIETNIA 2025

Komitet Naukowy

Janusz Piechowicz – *Przewodniczący*

Wojciech Batko

Dariusz Bismor

Adam Brański

Ireneusz Czajka

Rafał Delekta

Tadeusz Kamisiński

Iwona Kochańska

Janusz Kompala

Mirosław Meissner

Artur Nowosiwiat

Krzysztof Opiełński

Paweł Pawlik

Adam Pilch

Dariusz Pleban

Marek Pluta

Wojciech Rdzanek

Bartłomiej Stępień

Stefan Weyna

Jerzy Wiciak

Tadeusz Wszolek

Wiesław Wszolek

Komitet Organizacyjny

Marek Pluta

– *Przewodniczący*

Ireneusz Czajka

Bartłomiej Chojnacki

Marta Kucejko

Janusz Piechowicz

Adam Pilch

Bartłomiej Stępień

Katarzyna Suder-Dębska

Roman Trojanowski

Tadeusz Wszolek

Streszczenia referatów

Ocena wpływu warunków brzegowych na wyznaczenie modułu Younga cienkich warstw materiałów miękkich z wykorzystaniem bezkontaktowo wzbudzanych fal prowadzonych

Assessing the impact of boundary conditions on non-contact guided-wave estimation of Young's modulus in soft, thin layers

Łukasz Ambroziński, Patrycja Pyzik

ambrozin@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

W ostatnich latach elastografia fal poprzecznych jest narzędziem stosowanym do określania materiałów miękkich w tym tkanek biologicznych. Typowo metoda ta jest stosowana do badania materiałów objętościowych, w których można zaobserwować propagację fal poprzecznych. Jeżeli grubość badanego materiału jest znacznie mniejsza niż długość fali poprzecznych, propagujące fale mają naturę fal prowadzonych. W takich przypadkach należy wziąć pod uwagę warunki brzegowe na granicach ośrodków. W tym artykule opisano propagację fal prowadzonych w cienkim fantomie żelatynowo-hydrożelowym. Do wzbudzenia, wykorzystano metodę akustycznego mikro ucisku (ang. *Acoustic micro tapping* $A\mu T$), wykorzystującą zogniskowany przetwornik ultradźwiękowy, który wytwarza siłę radiacji akustycznej wynikającą z odbicia wiązki ultradźwiękowej. W eksperymencie rozważane są dwa scenariusze: symetryczne warunki brzegowe powietrze-próbka-powietrze i niesymetryczne warunki brzegowe powietrze-próbka-woda. Krzywe dyspersji uzyskane w obu przypadkach zostały porównywane z wynikami analitycznymi obliczonymi przy użyciu odpowiednich warunków brzegowych. Oszacowanie prędkości fali poprzecznej zostały użyte do wyznaczenia modułu Younga badanej próbki.

Over the recent years, shear waves elastography has been developed as a tool permitting imaging of soft materials, particularly in medicine to evaluate human tissues elasticity. When considering thin materials, the thickness is much smaller than the wavelength of the excited shear waves, therefore boundary conditions at the sample interfaces must be considered. In this paper we present non-contact experimental evaluation of guided waves propagation in thin gelatin hydrogel phantom. The method used for excitation, called acoustic micro tapping ($A\mu T$), uses a focused air-coupled ultrasonic transducer that creates acoustic-radiation force resulting from reflection of the ultrasonic beam. In the experiment, two scenarios are considered: symmetric air-sample-air and non-symmetric air-sample-water interfaces. Dispersion curves obtained from both cases are compared with analytical results calculated using suitable boundary conditions. The estimation of shear wave velocity leads to obtain Young's modulus of tested layer.

Non-contact estimation of respiratory and heart rates from audio signals using ensemble empirical mode decomposition and genetic algorithm

Non-contact estimation of respiratory and heart rates from audio signals using ensemble empirical mode decomposition and genetic algorithm

Abiodun Amoran, Dariusz Bismor

abiodun.amoran@polsl.pl

Silesian University of Technology

This article presents a method for estimating Respiratory Rate (RR) and Heart Rate (HR) from an audio signal recorded using a microphone. The proposed method employs Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and a Genetic Algorithm (GA) for signal decomposition and feature selection. The recorded signal were pre-processed using wavelet denoising to remove noise, thus preserving the signal characteristics. EEMD is applied to decompose the denoised signal into Intrinsic Mode Functions (IMFs) that corresponds to respiratory information. In order to obtain optimal IMF section, GA is used, with Mutual Information (MI) between the original signal and each IMF serving as the fitness function. This process ensures only relevant IMFs are chosen to estimate RR and HR. The GA-selected IMFs are automatically categorized into two groups for RR and HR estimation. The selected IMFs in each category were summed and reconstructed, their dominant frequency component are extracted using Fast Fourier Transform (FFT) to estimate RR and HR. The performance evaluation showed Mean Absolute Error 1.25 BPM for RR and 7.85 BPM for HR.

Jak brzmi Meduza

What Fisheye sounds like

Mateusz Bień

mateusz.bien@amuz.krakow.pl

Akademia Muzyczna im. Krzysztofa Pendereckiego w Krakowie

Relacja światła i dźwięku jest obszarem twórczych inspiracji od tysiącleci. Jednym z przełomowych momentów w jej historii jest wydana pod koniec XVII w. *Opticks: or, A treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*, Sir Izaaka Newtona.

W tej i kolejnych publikacjach składniki „widma” dźwięków rozumiane są jako skala lub składniki akordu tworzące zbiór dźwięków o różnej wysokości. O ile więc barwa w teorii światła jest już czymś niepodzielnym, o tyle wysokość dźwięku jest tylko pewną informacją o dźwięku, wskazującą na prawdopodobną, najniższą składową jego widma.

Być może więc bardziej adekwatną relacją światło-dźwięk jest analogia znana choćby z opisów szumów. Szum biały ma równą zawartość wszystkich częstotliwości (a więc wszystkich barw podstawowych). Szum różowy ma większą amplitudę w zakresie niższych częstotliwości, a że niższe zakresy światła widzialnego mają barwę czerwoną „kolorują” więc szum na różowo.

Ten właśnie problem zainspirował autora do dalszych poszukiwań, w trakcie których zetknął się z propozycją sonifikacji barw realizowaną przez NASA. Próbował rozwiązać problem „nudnej muzycznie”, statycznie brzmiącej projekcji pojedynczej barwy, poznał różne typy mikro-dźwięków mogących pełnić funkcje elementarnych cząstek sonifikacji. Szczegóły tych poszukiwań i ich dźwiękowy efekt zostanie przedstawiony w trakcie konferencji.

The relationship between light and sound has been an area of creative inspiration for millennia. One of the landmarks in its history is published at the end of the 17th century Opticks: or, A treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light, by Sir Izaak Newton.

In his and later publications, the individual components of the ‘spectrum’ of tones are understood as the scale or chord components forming a set of tones of different pitch. So while timbre in light theory is already something indivisible, pitch is only some information about a sound, indicating the probable lowest component of its spectrum.

Perhaps, then, a more appropriate light-sound relationship is the analogy known even from descriptions of noise. White noise has an equal content of all frequencies (and therefore all primary colours). Pink noise has greater amplitude in the lower frequency range, and since the lower ranges of visible light are red they therefore ‘colour’ the noise pink.

The above-mentioned problems were the starting point for the author’s further artistic research, where he encountered NASA sonification ideas, tried to solve a “boring pure tone” problem, found several kinds of microsounds that can be treated as

elementary particles of sonification. More detailed information and music examples of his research will be presented during the conference.

Optymalizacja geometrii elementu podstawowego metamateriału wibroakustycznego do wielozakresowego zwiększania izolacyjności akustycznej

Optimization of a vibroacoustic metamaterial's unit cell geometry for multi-band noise reduction

Klara Chojnacka

klara.chojnacka@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Metamateriały wibroakustyczne składają się z elementów rezonansowych, które najczęściej mają formę belki jednostronnie utwierdzonej z dodatkową masą. Elementy rezonansowe, rozmieszczone w odpowiednich odległościach na przegrodzie, tłumią propagujące się fale, co prowadzi do zwiększenia jej izolacyjności akustycznej. Zakres częstotliwości, w którym następuje redukcja drgań i hałasu, nazywany jest pasmem zaporowym. Element rezonansowy może generować wiele pasm zaporowych, a ich liczba zależy od liczby częstotliwości rezonansowych, w których jego masa efektywna działająca na przegrodę jest odpowiednio duża w stosunku do masy samej przegrody. Dobór geometrii elementu rezonansowego dla pojedynczego zakresu częstotliwości jest stosunkowo prosty, natomiast zaprojektowanie elementu skutecznego w kilku pożądanym zakresach stanowi większe wyzwanie. Problem ten można uprościć poprzez zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych. W pracy przedstawiono procedurę optymalizacji geometrii podstawowego elementu metamateriału wibroakustycznego do zwiększenia izolacyjności akustycznej w kilku zakresach częstotliwości oraz wyniki symulacji potwierdzających skuteczność zastosowanych metod. Opracowano parametryczny model numeryczny elementu rezonansowego, w którym wybrane wymiary podlegały optymalizacji, a pozostałe były od nich zależne. Wpływ metamateriału na izolacyjność akustyczną przegrody oceniono na podstawie symulacji numeryczno-analitycznych, wykorzystujących masę efektywną elementu rezonansowego jako parametr pośredni.

Optymalizację przeprowadzono z wykorzystaniem ewolucyjnego algorytmu różnicowego, umożliwiającego wielokryterialne dostosowanie geometrii elementu do zwiększenia izolacyjności akustycznej przegrody w kilku zakresach częstotliwości. Jedną z głównych zalet metamateriałów wibroakustycznych jest ich niewielka masa i kompaktowe rozmiary elementów, dlatego optymalizację przeprowadzono przy ograniczeniu masy dodanej przez metamateriał do przegrody.

Vibroacoustic metamaterials consist of unit cells made of single resonant elements, most commonly in the form of cantilever beams with an additional mass. When placed at specific distances on a plate, these elements attenuate propagating waves, enhancing sound insulation. The frequency range in which vibration and noise reduction occur is known as the bandgap. A resonant element can generate multiple bandgaps, with their number depending on the element's resonance frequencies at which its effective mass exerted on the base plate is sufficiently large compared to the plate's mass. Designing the geometry of a resonant element for a single frequency

range is relatively straightforward; however, developing an element effective across multiple frequency ranges presents a greater challenge. This issue can be addressed by employing optimization algorithms. This study presents an optimization procedure for the geometry of a resonant element aimed at improving sound insulation across multiple frequency bands, along with simulation results confirming the effectiveness of the applied methods. A parametric numerical model of the resonant element was developed, in which selected dimensions were subject to optimization, while others were dependent on them. The effect of the metamaterial on the acoustic insulation of the partition was assessed using numerical-analytical simulations that utilize the effective mass of the resonant element as a transitional parameter. Optimization was performed using a differential evolution algorithm, enabling multi-objective optimization of the element's geometry to enhance acoustic insulation over multiple frequency ranges. One of the key advantages of vibroacoustic metamaterials is their low mass and compact size, which is why the optimization was conducted under the constraint of the additional mass introduced to the partition by the metamaterial.

Zastosowanie metod pomiarowych akustyki małych pomieszczeń na drodze badań akustycznych w skali

Application of acoustic measurement methods for small rooms through acoustic tests in scale modeling

Bartłomiej Chojnacki, Paulina Pik

bchojnacki@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Akustyka małych pomieszczeń jest specyficznym działem akustyki wnętrz, wprowadzając konieczność wprowadzania nowych metod analizy. W tradycyjnych podejściach do oceny akustyki pomieszczeń wykorzystuje się pomiary oraz symulacje komputerowe. Obie te metody mają jednak swoje ograniczenia – pomiary pełnowymiarowe wymagają dostępu do badanego obiektu, natomiast symulacje komputerowe, często opierają się na uproszczonych modelach propagacji dźwięku, które mogą nie uwzględniać wszystkich zjawisk falowych. W tym kontekście coraz większym zainteresowaniem cieszą się modele akustyczne w skali, które stanowią alternatywną metodę badania i planowania adaptacji akustycznych. Zastosowanie modelu redukcyjnego pozwoliłoby na znaczną redukcję kosztu badań różnych urządzeń do adaptacji akustycznej ze względu na znacznie niższy koszt próbek badawczych. Celem niniejszej pracy było omówienie zasadności stosowania modeli redukcyjnych w akustyce małych pomieszczeń, przeprowadzenie analizy ich skuteczności w odwzorowywaniu parametrów akustycznych oraz przedstawienie możliwości ich wykorzystania w planowaniu adaptacji akustycznej. Na wykonanym modelu w skali 1:8 przeprowadzono pomiary w zakresie częstotliwości 160-80000 Hz oraz wykonano analizy porównawcze kilku wariantów adaptacji akustycznej w modelu oraz pomieszczeniu pełnowymiarowym. Wyniki wskazują na obiecujące możliwości z zastosowania modeli w skali w analizach akustyki małych pomieszczeń.

The acoustics of small rooms is a specific area of interior acoustics, requiring the introduction of new analysis methods. Traditional approaches to assessing room acoustics use measurements and computer simulations. However, both of these methods have their limitations - full-scale measurements require access to the object under test, while computer simulations are often based on simplified sound propagation models that may not take into account all wave phenomena. In this context, scaled acoustic models are becoming increasingly popular as an alternative method of testing and planning acoustic adaptations. The use of a reduction model would allow a significant reduction in the cost of testing various acoustic adaptation devices due to the much lower cost of test samples. The aim of this work was to discuss the legitimacy of using reduction models in the acoustics of small rooms, to analyse their effectiveness in reproducing acoustic parameters and to present the possibilities of their use in planning acoustic adaptation. On the completed model in a scale of 1:8, measurements were taken in the frequency range of 160-80000 Hz and comparative analyses were performed of several variants of acoustic adaptation in the model and

a full-size room. The results indicate promising possibilities of using scale models in the analysis of small room acoustics.

Badania zostały sfinansowane w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki pozyskanego w konkursie MINIATURA 8, nr umowy 2024/08/X/ST8/00081.

Więcej czy mniej odbić? Próba oceny preferencji słuchaczy dla pomieszczeń przez porównanie głośników konwencjonalnych i głośników modów rozproszonych

More or less reflections? An attempt to estimate listeners' preferences for rooms by comparing conventional and DML loudspeakers

Karol Czesak, Piotr Kleczkowski, Aleksandra Król-Nowak

czesak@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Znany jest wpływ stosunku energii dźwięku bezpośredniego do odbitego w pomieszczeniu odsłuchowym na percepcję odtwarzanego dźwięku i jego oceny jakościowe. Przewaga dźwięku bezpośredniego sprzyja lepszemu rozpoznawaniu szczegółów odtwarzanych dźwięków i precyzyjniejszej lokalizacji źródeł pozornych. Przewaga dźwięku odbitego sprzyja wrażeniu przestrzenności. Ilościowy związek między wyżej opisanym stosunkiem i odczuciami jest słabo zbadany. Innym niepodjętym tematem badawczym są ewentualne różnice pomiędzy słuchaczami w ich preferencjach dla większej lub mniejszej zawartości odbić w dźwięku. Takie badania napotykają na istotną trudność w wyniku wymagań eksperymentalnych. Najbardziej korzystnym środowiskiem eksperymentalnym byłaby możliwość szybkiego przełączania pomiędzy różnymi akustykami w tym samym pomieszczeniu. Możliwe jest stosowanie metod pośrednich, jednak wprowadzają one zmienne zakłócające, które mogą istotnie przesłonić wyniki, gdy różnice percepcyjne są niewielkie. Rozwiązaliśmy ten problem używając dwóch różnych typów głośników:

- a) konwencjonalnego,
- b) głośnika modów rozproszonych (GMR).

Mają one całkiem różne charakterystyki kierunkowe. GMR promieniuje znacząco więcej energii w kierunku przegród pomieszczenia niż w kierunku osi promieniowania głośnika. W ten sposób GMR wytwarza dźwięk o niższym stosunku dźwięku bezpośredniego do odbitego w miejscu słuchacza niż głośnik konwencjonalny. W niniejszej pracy wybraliśmy część wyników eksperymentu porównującego percepcję dźwięku z głośników obu rodzajów oraz przeprowadziliśmy ich analizę i dodatkowe przetwarzanie, w celu odpowiedzi na dwa pytania:

- a) jak różnice pomiędzy oboma głośnikami, czyli dwiema postrzeganymi akustykami wpływają na odczucia precyzji i przestrzenności odtwarzanego dźwięku, oraz
- b) w jaki sposób słuchacze różnią się pod względem preferencji dla precyzji albo przestrzenności.

The ratio of direct to reflected sound energy in a listening room is known to affect the perception of reproduced sound and its qualitative evaluations. More direct sound favors better recognition of detail and more precise localization of virtual sound sources. More reflected sound favors perceived spaciousness. Little is known about quantitative relation between this ratio and sensation. Another unexplored research

topic is whether there are considerable differences between listeners in their preference for more or less reflections. Research in this area is impeded by experimental requirements. Fast switching between acoustics of one listening room would be a most advantageous arrangement. Indirect methods may be used, but they introduce confounding variables that may obscure results when perceptual differences are subtle. We have solved this problem by using two different types of loudspeakers:

- (i) a conventional one,*
- (ii) the Distributed Mode Loudspeaker (DML).*

They have very different directional characteristics. The latter radiates substantially more energy towards walls of a room than along the loudspeaker axis. Thus, the DML produces a lower ratio of direct to reflected sound energy in the listening position than the conventional loudspeaker. In this work we selected a portion of the results from an experiment comparing perception of sounds from the two loudspeaker types, and analyzed and processed them in order to answer two questions:

- (i) how the differences between the two loudspeakers i.e. the two perceived room acoustics affect sensations of precision and spatiality, and*
- (ii) how listeners differ in their preference towards either precision or spatiality.*

Stabilność aparatury nagłaśniającej w środowisku o zmiennych warunkach atmosferycznych

Stability of sound equipment in an environment with changing weather conditions

Rafał Jacek Delekta

delekta@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Wystąpienie dotyczy wpływu zmieniających się warunków atmosferycznych na stabilność ustawień aparatury nagłaśniającej w salach wielkokubaturowych oraz na wolnym powietrzu.

1. Geneza problematyki wystąpienia Z przedstawionym problemem zetknąłem się jako kierownik muzyczny Teatru Muzycznego w Gdyni, odpowiedzialny również za ostateczny efekt dźwiękowy czyli po przejściu przez aparaturę nagłaśniającą. Podczas przygotowywania jednej z premier zostaliśmy zaskoczeni następującym zjawiskiem: Na porannej próbie została pieczołowicie ustawiona aparatura nagłaśniająca. Dokonano tego podczas próby dźwięku – czyli ustawienia wszystkich parametrów aparatury oraz w trakcie próby, kiedy na bieżąco dokonywano korekt. Podczas próby dźwięku tuż przed spektaklem, okazało się, że pomimo braku ingerencji w ustawienia aparatury po porannej próbie, trzeba było w sposób zasadniczy zmienić ustawienia aparatury. Zachowanie poprzednich ustawień spowodowałoby brak przejrzystości warstwy dźwiękowej, zafałszowanie barwy głosu ludzkiego, niewłaściwy odbiór niskich częstotliwości oraz brak selektywności brzmienia orkiestry. Przyczyną była zmiana warunków atmosferycznych spotęgowana położeniem budynku – w odległości 100 metrów od plaży i morza.
2. Podobne zjawiska pojawiają się podczas pracy aparatury nagłaśniającej na wolnym powietrzu.
3. Dyskusja nad wystąpieniem powinna doprowadzić do pojawienia się idei środków zaradczych, które mogą spowodować automatyczny sposób reagowania samej aparatury na zmieniające się warunki atmosferyczne. Chodzi przede wszystkim o możliwość pomiaru zmian gęstości powietrza, która walnie wpływa na rozchodzenie się fali dźwiękowej.

Analiza wykorzystania struktur geometrycznych w membranie głośnikowej

Analysis of the use of geometric structures in a loudspeaker membrane

Miłosz Derżko, Adam Pilch

milder@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Metamateriały zyskują coraz większe zainteresowanie w wielu dyscyplinach naukowych. Są to małe struktury geometryczne, które zmieniają właściwości materiału w zależności od częstotliwości, wykorzystując zjawisko rezonansu akustycznego. Niniejsze badanie przedstawia proces włączenia tych struktur do membrany głośnikowej. Przeprowadzono podstawowe analizy wpływu geometrii na kierunkowość promieniowanej fali dźwiękowej w zakresie niskich częstotliwości. Geometrie membrany zostały zamodelowane przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics. Zbadano szereg konfiguracji, obejmujących podstawowe układy rezonansowe oraz geometrie umożliwiające kontrolę propagacji fali akustycznej.

Metamaterials are garnering heightened interest across a multitude of scientific disciplines. These structures are diminutive geometric configurations that alter the properties of a material according to the frequency, through the utilization of the phenomenon of acoustic resonance. The study delineates the incorporation of these structures into a loudspeaker membrane. The research conducts fundamental analyses of the influence of geometry on the directivity of radiated sound waves in the low-frequency range. The membrane architectures were simulated employing the COMSOL Multiphysics software. A range of configurations was examined, encompassing fundamental resonant systems and geometries that facilitate regulation of acoustic wave propagation.

Hydrofony ultradźwiękowe

Ultrasound hydrophones

Katarzyna Falińska

katarzyna.falinska@gum.gov.pl

Główny Urząd Miar

Prezentacja dotyczy hydrofonów membranowych, które stanowią fundamentalną grupę wśród hydrofonów ultradźwiękowych w zastosowaniach medycznych. Hydrofony ultradźwiękowe wykorzystywane są do pomiarów i charakterystyki pól akustycznych generowanych przez urządzenia medyczne. Pomiaru te są istotne ze względów bezpieczeństwa pacjenta. W niniejszej pracy zostaną wymienione podstawowe parametry charakteryzujące hydrofony i ich wpływ na możliwości aplikacyjne hydrofonów. Ponadto zostaną przedstawione właściwości hydrofonów membranowych, dzięki którym są uznawane za „złote” wzorce używane w metrologii do wzorcowania hydrofonów ultradźwiękowych.

The paper presents membrane hydrophones which are a fundamental group among ultrasonic hydrophones in medical applications. Ultrasonic hydrophones are used for measurements and characterization of medical ultrasonic fields generated by medical devices. These measurements are important for patient safety reasons. This paper presents the major parameters characterizing hydrophones and their influence on the application possibilities of hydrophones. In addition, there will be presented the properties of membrane hydrophones, which make them the “gold” standards used in metrology for the calibration of ultrasonic hydrophones.

Stanowisko do badania właściwości dźwiękochłonnych materiałów w zakresie niskich częstotliwości

A stand for testing the sound-absorbing properties of materials in the low-frequency range

Artur Flach

flach@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

W artykule przedstawiono budowę stanowiska do wyznaczania współczynnika pochłaniania dźwięku w zakresie niskich częstotliwości. Stanowisko to jest rurą impedancyjną zgodną z PN-EN ISO 10534-2, jednak przy znacząco zmienionych wymiarach geometrycznych względem dostępnych rozwiązań na rynku. Charakterystyczną cechą skonstruowanego stanowiska jest wysoka masywność. Osiągnięto ją poprzez zastosowanie granitu, z którego falowód jest zbudowany, co przekłada się na wysoką jakość obserwacji zjawisk falowych. Przedstawione wyniki badań potwierdzają zamierzony efekt modernizacji.

The article presents the construction of a stand for determining the sound absorption coefficient in the low frequency range. This stand is an impedance tube compliant with PN-EN ISO 10534-2, but with significantly changed geometric dimensions compared to the solutions available on the market. A characteristic feature of the constructed stand is its high massiveness. This was achieved by using granite, from which the waveguide is built, which translates into high quality of wave phenomena observation. The presented research results confirm the intended effect of modernization.

Wpływ rodzaju materiałów użytych do wzbudzenia struny wiolonczeli na jej brzmienie

The impact of materials type used to excite a cello strings on its sound

Łukasz Gorazd

gorazd@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Celem artykułu jest porównanie wpływu popularnych materiałów tekstylnych użytych do wzbudzenia strun wiolonczeli na jej brzmienie. Został zaprojektowany i wykonany mechanizm umożliwiający regulację napięcia wybranego materiału analogicznie jak w przypadku napięcia włosia w smyczku wiolonczelowym. Przy pomocy mechanizmu dźwięk generowany jest w sposób ciągły, zapewniając powtarzalność. Wpływ poszczególnych materiałów użytych do wzbudzenia strun wiolonczeli określono na podstawie pomiarów akustycznych przy użyciu wielokanałowego systemu rejestracji. W pracy przedstawiono widma dźwięku wiolonczeli oraz określono środek ciężkości widma, który jest decydującym parametrem związanym z barwą instrumentu.

The aim of this paper is to compare the impact of popular textile materials used to excite cello strings on its sound. A mechanism was designed and manufactured to allow for the regulation of the tension of the selected material, similarly to the tension of the hair in a cello bow. The mechanism allows for the generation of sound in a continuous manner, ensuring repeatability. The influence of individual materials used to excite cello strings was determined based on acoustic measurements using a multi-channel recording system. The paper presents the spectra of the cello sound and determines the spectral centroid, which is a decisive parameter related to the timbre of the instrument.

Wzajemność w izolacyjności akustycznej niesymetrycznych przegród dwupłytowych

Reciprocity in acoustic insulation of asymmetric double-leaf structures

Julia Idczak, Jarosław Rubacha, Tadeusz Kamisiński

idczak@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Lekkie przegrody dwupłytowe, składające się z płyt gipsowo-kartonowych połączonych profilami stalowymi, są powszechnie stosowane w budownictwie ze względu na liczne zalety, takie jak łatwość i szybkość montażu, niewielka masa oraz wysoka izolacyjność akustyczna w zakresie wysokich częstotliwości. Jednak ich skuteczność w ograniczaniu transmisji dźwięków niskoczęstotliwościowych pozostaje ograniczona. Powszechnie stosowaną metodą poprawy izolacyjności akustycznej jest zwiększenie masy całej struktury, przykładowo poprzez dodanie kolejnej płyty gipsowo-kartonowej po stronie nadawczej lub odbiorczej, tworząc tym samym strukturę o niesymetrycznej budowie. W przypadku niesymetrycznych przegród dwupłytowych kluczowe staje się jednak pytanie o występowanie wzajemności w izolacyjności akustycznej. Wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem wzbudnika elektromagnetycznego, wskazują na istotny wpływ kierunku propagacji drgań w strukturach niesymetrycznych. Przedstawiona analiza identyfikuje kluczowe parametry odpowiedzialne za brak wzajemności, koncentrując się na impedancji wejściowej oraz współczynniku wypromieniowania dźwięku przez struktury płytowe, ze szczególnym uwzględnieniem kierunku transmisji dźwięków materiałowych w strukturach dwupłytowych.

Lightweight double-leaf partitions, consisting of plasterboard panels connected by steel profiles, are widely used in construction due to their numerous advantages, such as ease and speed of installation, low weight, and high acoustic insulation in the high-frequency range. However, their effectiveness in limiting sound transmission at low frequencies remains limited. A commonly used method to improve acoustic insulation is to increase the mass of the entire structure, for example, by adding an additional plasterboard panel to the source or receiver side, thereby creating a structure with an asymmetric design.. However, in the case of asymmetric double-leaf partitions a key question arises regarding the reciprocity of acoustic insulation. Experimental results, obtained using an electromagnetic shaker, indicate a significant impact of the direction of vibration propagation in asymmetric structures. The presented analysis identifies key parameters responsible for the lack of reciprocity, focusing on the input impedance and the sound radiation coefficient of the panel structures, with particular attention to the direction of sound transmission in double-leaf structures.

Wyzwania w ocenie właściwości mechanicznych tkanek metodą ultradźwiękowej elastografii fali poprzecznej

Challenges in the assessment of tissue mechanical properties by ultrasound shear wave elastography

Piotr Kijanka

pkijanka@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Właściwości biomechaniczne tkanek odgrywają kluczową rolę w ich charakteryzacji, ponieważ zmiany patologiczne i fizjologiczne związane ze starzeniem się i chorobami często prowadzą do modyfikacji składu, struktury i funkcji tkanek. Dokładna ocena tych właściwości umożliwia wczesną diagnostykę oraz lepsze zrozumienie różnych stanów fizjologicznych, co przyczynia się do skuteczniejszego leczenia chorób dotykających m.in. wątroby, piersi i tarczycy.

Obrazowanie ultradźwiękowe dostarcza informacji o anatomii tkanek, przepływie krwi oraz ich właściwościach materiałowych, a elastografia fali poprzecznej (SWE) staje się powszechnie stosowaną metodą do obiektywnej oceny biomechaniki narządów w praktyce klinicznej. Większość dostępnych na rynku technik dwuwymiarowej (2D) SWE wykorzystuje wiązki siły promieniowania akustycznego (ARF) do generowania fal poprzecznych rozchodzących się w tkankach. Jednak kliniczne wdrożenia SWE różnią się pod względem sposobu generowania wiązek ARF, metod obrazowania ultradźwiękowego do śledzenia fali poprzecznej, filtracji ruchu oraz algorytmów szacowania prędkości fali.

Ze względu na przytoczone różnice między producentami, w badaniach przeprowadzonych zarówno na fantomach, jak i w populacjach pacjentów wykazano zmienność mierzonych właściwości biomechanicznych. Aby zwiększyć wiarygodność diagnostyczną metod 2D SWE w różnych zastosowaniach klinicznych, konieczne jest opracowanie rozwiązań niezależnych od używanego aparatu oraz zastosowanych schematów akwizycji i przetwarzania danych. Niniejsza praca omawia wyzwania związane z obecnymi wdrożeniami SWE oraz podkreśla potrzebę standaryzacji w celu poprawy spójności i dokładności diagnostycznej.

The biomechanical properties of tissues are crucial for their characterization, as pathological and physiological changes associated with aging and disease often alter tissue composition, structure, and function. Accurate assessment of these properties enables early diagnosis and improved understanding of various physiological states, contributing to better treatment of conditions affecting organs such as the liver, breast, and thyroid.

Ultrasound imaging provides information on tissue anatomy, blood flow, and material properties, with shear wave elastography (SWE) emerging as a widely used tool for objective biomechanical evaluation in clinical practice. Most commercially available two-dimensional (2D) SWE techniques rely on acoustic radiation force (ARF) beams to generate shear waves propagating through tissues. However, clinical implementations of SWE vary significantly in ARF beam generation, ultrasound

imaging methods for shear wave tracking, motion filtering, and velocity estimation algorithms.

Due to these differences across manufacturers, studies have reported variability in measured biomechanical properties, both in phantom experiments and patient populations. To improve the diagnostic reliability of 2D SWE across various clinical applications, the development of machine-independent methods that minimize the impact of acquisition and processing variations is essential. This work discusses the challenges associated with current SWE implementations and highlights the need for standardization to enhance consistency and diagnostic accuracy.

Wykrywanie aktywności rodziny pszczelej na podstawie nieinwazyjnego monitoringu drgań struktury ula

Detection of honeybee colony activity based on non-invasive monitoring of beehive structure vibrations

Piotr Książek, Bogusław Szlachetko

piotr.ksiazek@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska

Monitoring wibroakustyczny rodziny pszczelej jest prężnie rozwijającą się interdyscyplinarną dziedziną na pograniczu nauk rolniczych, wibroakustyki oraz przetwarzania sygnałów. Jednym z interesujących aspektów tej dyscypliny jest monitoring drgań generowanych przez rodzinę pszczelą w okresie wczesnowiosennym, gdy wychodząc z okresu zimowego pszczoły zwiększają poziom swojej aktywności i wylatują z ula w trakcie oblotu wczesnowiosennego. Estymacje aktywności rodziny pszczelej na podstawie drgań były wykonywane w trakcie dotychczasowych badań, jednak znacząca część prac skupia się na umieszczaniu akcelerometrów o wysokiej czułości wewnątrz gniazda pszczelego, w sposób inwazyjny wobec samej rodziny, co znacząco redukuje możliwości aplikacji takiego rozwiązania na dużą skalę. Niniejsza praca dotyczy systemu wykrywania aktywności rodziny pszczelej na podstawie monitoringu drgań rejestrowanych przy wykorzystaniu ogólnodostępnych akcelerometrów typu MEMS oraz autorskiego systemu monitoringu opartego o platformę ESP32 oraz technologie IoT. Opracowana metoda jest zdolna do wykrywania zdarzeń związanych z aktywnością rodziny pszczelej na podstawie parametrów energetycznych oraz widmowych monitorowanego sygnału drgań. Wykazano także korelację pomiędzy temperaturą rejestrowaną w miejscu pomiaru drgań oraz energią drgań przefiltrowanych w paśmie częstotliwościowym charakterystycznym dla rodziny pszczelej (150-500 Hz), co może być przydatne w przyszłych badaniach, w szczególności dla monitoringu pszczół w okresie zimowym.

Vibroacoustic monitoring of honeybee colonies is a thriving interdisciplinary field at the intersection of agricultural science, vibroacoustics and signal processing. One of the interesting aspects of this discipline is the monitoring of vibrations generated by the bee colony during the early spring period, when, coming out of the winter period, honeybees increase their level of activity and fly out of the hive during the early spring flight. Vibration-based estimations of bee colony activity have been performed in previous research, but much of the work concentrates on placing high-sensitivity accelerometers inside the bee nest in a way that is invasive to the colony itself, significantly reducing the potential for large-scale application of such a solution. The presented work covers a system for detecting bee colony activity based on monitoring of vibrations recorded using widely available MEMS-type accelerometers and a proprietary monitoring system based on the ESP32 platform and IoT technologies. The developed method is capable of detecting bee colony activity events based on the energy and spectral parameters of the monitored vibration signal. The correlation between the temperature recorded at the vibration measurement site and the vibration energy

filtered in the frequency band characteristic of the bee colony (150–500 Hz) was also demonstrated, which may be useful for future research, especially for monitoring bees in winter.

Analiza porównawcza metod pomiaru płyty pogłosowej na potrzeby dostrojenia modelu numerycznego

Comparative analysis of reverberation plate measurement methods for the purpose of tuning the numerical model

Marta Kucejko, Michał Kmiecik, Adam Korytowski

martakucejko@gmail.com

AGH w Krakowie

Modelowanie metodą różnic skończonych znajduje szerokie zastosowanie w mechanice, umożliwiając przewidywanie zachowania struktur płytowych na podstawie modeli matematycznych. Modele te wymagają jednak dostrojenia i weryfikacji na podstawie danych eksperymentalnych, takie działanie pozwala na odwzorowanie za ich pomocą zachowania rzeczywistego obiektu. Kluczowym jest uzyskanie danych pomiarowych cechujących system obarczonych możliwie najmniejszym błędem. W pomiarach rzeczywistych płyt, literaturowo wymienia się zastosowanie akcelerometrów. Powoduje to jednak trudności w strojeniu modeli - wymaga to podwójnego różniczkowania wyliczonych przez model przemieszczeń, co prowadzi do utraty składowej stałej. Z kolei przemieszczenia, jako wielkości bezpośrednio przewidywane przez model, powinny dostarczać bardziej wiernych danych, lecz ich pomiar jest rzadziej stosowany ze względu na trudności techniczne. Niniejsza praca opisuje dwa eksperymenty przeprowadzone korzystając z fizycznej płyty pogłosowej, mierząc przemieszczenia za pomocą laserowego czujnika oraz przyspieszenia za pomocą akcelerometru. Celem badania było porównanie obu metod pod kątem ich przydatności do kalibracji modelu różnic skończonych. Praca przedstawia wyniki analizy obu metod pod kątem jakości odzwierciedlenia rzeczywistego zachowania płyty oraz w jakim stopniu upraszcza proces dostrajania modelu numerycznego. Wyniki wskazują, że pomiary przemieszczeń mogą oferować dane o ruchu bez konieczności dodatkowej obróbki sygnału. Pomiary akcelerometryczne są bardziej rozpowszechnione ze względu na łatwość realizacji w stosunku do pomiarów przemieszczeń ruchu drgającego płyty.

Finite difference modeling is widely used in mechanics, enabling the prediction of the behavior of plate structures based on mathematical models. However, these models require tuning and verification based on experimental data in order to reproduce the behavior of the real object. The key is to obtain measurement data characterizing the system with the smallest possible error. In measurements of real plates, the use of accelerometers is mentioned in the literature. However, this causes difficulties in model tuning. The double differentiation of the displacements calculated by the model to obtain the acceleration value leads to the loss of the constant component. In turn, displacements, as quantities directly predicted by the model, should provide more faithful data, but their measurement is less often used due to technical difficulties. This paper describes two experiments conducted using a physical reverberation plate, measuring displacements using a laser sensor and accelerations using an accelerometer. The aim of the study was to compare both methods in terms of their

suitability for calibrating the finite difference model. The paper presents the results of the analysis of both methods in terms of the quality of representing the actual behavior of the plate and to what extent it simplifies the process of tuning the numerical model. The results indicate that displacement measurements can result with data without the need for additional signal processing. Accelerometric measurements are more widespread due to the ease of implementation compared to displacement measurements of the vibrating plate motion.

Odsluchowe badania nad przypisaniem autorstwa utworów muzycznych generowanych przez AI

Listening-Based research on the authorship attribution of AI-generated musical works

Paweł Małecki

pawel.malecki@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Generatywna sztuczna inteligencja (AI) umożliwia generowanie muzyki, bazując na oryginalnych utworach muzycznych napisanych przez człowieka. Autorzy lub wykonawcy tych oryginalnych nagrań przeważnie nie są uwzględniani w procesie generacji i dystrybucji wytworów AI, co może prowadzić do poważnych szkód materialnych i sporów dotyczących praw autorskich. Istnieją sposoby numerycznego określania autorstwa, ale brakuje wiarygodnego punktu odniesienia, by ocenić, na ile utwory tworzone przez AI są inspirowane danymi oryginałami. W tym celu wykonano system oceny oparty na percepcji, który bada wymierny wpływ utworu źródłowego na kompozycję wygenerowaną przez AI. Przygotowano warianty testowe oryginalnych utworów muzycznych z wykorzystaniem AI, a następnie za pomocą grupy odsluchowej wykonano ocenę podobieństwa. Dla odpowiedniego wyskalowania wyników zastosowano utwory referencyjne. Następnie zweryfikowano dokładność analitycznego przypisywania autorstwa, które osiągnęło ponad 95% zgodności z podejściem percepcyjnym.

Generative artificial intelligence (AI) makes it possible to create music based on original compositions written by humans. The authors or performers of these source recordings are usually not acknowledged during the generation and distribution of AI-produced works, which may lead to significant financial damage and copyright disputes. While methods do exist for numerically determining authorship, there is still no reliable benchmark for assessing how much AI-generated pieces are inspired by the original material. To address this gap, a perception-based evaluation system has been developed to measure the tangible influence of the source track on the AI-generated composition. Test variants of the original musical works were prepared using AI, and a listening panel then evaluated the similarities. Reference tracks were employed to calibrate the results appropriately. Finally, the accuracy of the analytical authorship assignment was verified, demonstrating over 95% agreement with the perception-based approach.

Analiza porównawcza materiałów kompozytowych i tradycyjnego drewna lutniczego dla instrumentów muzycznych

A comparative analysis of composite materials and traditional luthier woods for musical instruments

Paweł Małecki^{,**,***}, Agnieszka Paula Pietrzak^{*}, Filip Zakrzewski^{****,***}, Marek Matyjewski^{*}, Rafał Perz^{*,**,***}*

pawel.malecki@rufguitars.com

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

In recent years, composites have emerged as a promising alternative to traditional materials in various technological applications, including the manufacturing of musical instruments. This study investigates the dynamic behavior of conventional luthier woods versus innovative composite materials used in crafting guitar bodies, necks, and fretboards. The primary objective was to compare the dynamic characteristics of popular woods such as maple and mahogany with those of composites constructed from premade carbon fiber laminate and custom epoxy resin based mixtures of different fillers including microballoons, aerosil, graphite, and aluminum powders.

Samples of both wood and composite groups were prepared, and a frequency sweep was performed on each using a modal shaker and accelerometer setup. Frequency response curves were generated from the collected data, allowing for the calculation of dynamic parameters for each sample and subsequent group averaging. Comparative analysis revealed that while the amplitude across the frequency sweep remained similar between materials, there were notable shifts in frequency peaks. The composite materials generally maintained higher dynamic modulus values at lower frequencies and demonstrated superior retention of dynamic properties at higher frequencies compared to wood. Additionally, variations in the mass ratio of epoxy and fillers visibly altered the dynamic characteristics, suggesting the potential for tailored material performance.

These findings imply that by carefully manipulating filler mixtures within composite laminates, it is feasible to engineer synthetic materials capable of substituting natural wood, while offering comparable or enhanced dynamic properties. This study opens a pathway for further research into the role of specific fillers in modulating the frequency response of composite materials, which may ultimately lead to more optimized designs in musical instrument manufacturing.

Innowacyjne gitary elektryczne z materiałów kompozytowych – nowe podejście do konstrukcji instrumentów muzycznych

Innovative electric guitars from composite materials – a new approach to musical instrument construction

Paweł Małecki^{,**,***}, Filip Zakrzewski^{**,***}, Rafał Perz^{*,**,***}*

pawel.malecki@rufguitars.com

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

Współczesna produkcja gitar elektrycznych opierała się głównie na konstrukcjach drewnianych, które charakteryzowały się ograniczeniami wynikającymi z podatności na warunki atmosferyczne, dużej masy oraz ograniczonej wytrzymałości mechanicznej. W odpowiedzi na te wyzwania, marka RUF Gitara podjęła prace badawczo-rozwojowe, sfinansowane ze środków Unii Europejskiej, mające na celu opracowanie nowej generacji gitar elektrycznych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych, co miało poprawić właściwości mechaniczne i użytkowe instrumentów.

Celem realizowanych badań było stworzenie gitar o ultra-cienkim gryfie (poniżej 15 mm), ultra-niskiej wadze (poniżej 1,5 kg) oraz zwiększonej odporności na czynniki klimatyczne, zarówno temperaturowe, jak i wilgotnościowe. Dodatkowo, wdrożono pionierskie w lutnictwie antybakteryjne zabezpieczenie gryfu przy użyciu cząstek nano-srebra. W ramach badań zastosowano zaawansowaną analizę materiałową, modelowanie konstrukcyjne w środowisku CAD oraz symulacje MES, umożliwiające optymalizację konstrukcji. Przeprowadzono szereg testów obejmujących właściwości mechaniczne, dynamiczne oraz stabilności stroju w różnych warunkach środowiskowych.

Wyniki porównawczych badań gitar kompozytowych z tradycyjnymi modelami drewnianymi wykazały znaczną redukcję masy oraz poprawę stabilności stroju przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej sztywności gryfu i zwiększonej wytrzymałości funkcjonalnej oraz krytycznej.

Przeprowadzone prace badawczo-rozwojowe i wdrożeniowe udokumentowały, że zastosowanie materiałów kompozytowych może skutecznie wyeliminować istotne ograniczenia tradycyjnych konstrukcji gitar elektrycznych, otwierając nowe perspektywy w dziedzinie lutnictwa, elektroakustyki oraz inżynierii ergonomicznej.

Modern electric guitar production has traditionally relied on wooden constructions, which have been characterized by limitations due to weather susceptibility, high weight, and limited mechanical strength. In response to these challenges, the RUF Guitars brand initiated research and development efforts, funded by the European Union, aimed at developing a new generation of electric guitars using composite materials to enhance the instruments' mechanical and practical properties.

The objective of the research was to create guitars with an ultra-thin neck (below 15 mm), ultra-low weight (below 1.5 kg), and increased resistance to climatic factors, both temperature and humidity. Additionally, a pioneering approach in luthiery was implemented by coating the neck with nano-silver particles, designed to limit microorganism growth.

The research employed advanced material analysis, structural modeling in a CAD environment, and finite element simulations, enabling the optimization of the design. A series of tests was conducted to evaluate mechanical properties, dynamic behavior, and tuning stability under various environmental conditions. Comparative studies between composite guitars and traditional wooden models revealed a significant reduction in weight and improved tuning stability, while maintaining high neck stiffness and increased functional and critical strength.

The conducted research and development work demonstrated that the use of composite materials can effectively eliminate significant limitations of traditional electric guitar constructions, opening new perspectives in the fields of luthiery, electro-acoustics, and ergonomic engineering.

Stabilizator odłamów kostnych o innowacyjnej architekturze mechanicznej z systemem telemetrycznym

External fixation system with innovative telemetric structure

Piotr Mazurkiewicz

p.mazurkiewicz@master-med.com.pl

Master-med

Przedmiotem referatu jest prezentacja innowacyjnego systemu mechatronicznego, wykorzystywanego w leczeniu korekcji deformacji kończyn. Urządzenie zbudowane jest na bazie mechanizmu równoległego - platformy Stewarta. Konstrukcja składa się z co najmniej 2 pierścieni, które mogą mieć różne zakresy średnic wewnętrznych, oraz z 6 dystraktorów o zmiennej długości.

Obecnie, wszystkie będące na rynku aparaty tego typu, bazujące na zasadzie funkcjonalnej osteosyntezy, działają w sposób, który uniemożliwia lekarzowi śledzenie na bieżąco postępów leczenia oraz pozycji urządzenia w trakcie dystrakcji. Opracowany przez zespół MASTER-MED aparat, posiada zaawansowany system elektroniczny wyposażony w enkodery, oraz układ bezprzewodowej transmisji danych, który pozwala lekarzowi śledzić postęp leczenia w czasie rzeczywistym. Ponadto opracowany układ pozwala wyeliminować (lub znacznie zminimalizować) potencjalne błędy, które może popełnić pacjent w procesie leczenia i które się zdarzają w klasycznych aparatach regulowanych za pomocą tablicy pokręceń. W szczególności wyeliminowano częsty błąd kierunku oraz wartości zmiany położenia dystraktorów w cyklu dobowym, który skutkuje innym od oczekiwanego efektem końcowym procesu korekcji deformacji kończyny. Niezależnie został opracowany innowacyjny system kalibracji początkowej urządzenia na początku procesu, czyli określenie prawidłowej i dokładnej pozycji przestrzennej aparatu względem kości.

The subject of the paper is the presentation of an innovative mechatronic system used in the treatment of limb deformity correction. The device is built on the basis of a parallel mechanism - Stewart platform. The construction consists of at least 2 rings, which can have different ranges of internal diameters, and 6 distractors of variable length.

Currently, all devices of this type available on the market, based on the principle of functional osteosynthesis, operate in a way that prevents the doctor from monitoring the progress of treatment and the position of the device during distraction. The device developed by the MASTER-MED team has an advanced electronic system equipped with encoders, and a wireless data transmission system, which allows the doctor to monitor the progress of treatment in real time. In addition, the developed system allows to eliminate (or significantly minimize) potential errors that the patient may make during the treatment process and which occur in classic devices regulated by means of a table of turns. In particular, the frequent error in the direction and value of the change in the position of the distractors in the daily cycle, which results in a different than expected final effect of the limb deformity correction process, has been eliminated. Independently, an innovative system for initial cali-

bration of the device at the beginning of the process was developed, i.e. determining the correct and accurate spatial position of the device relative to the bone.

The work was financed under the R&D project no.: POIR.01.01.01-00-0381/17

Właściwości akustyczne płyt warstwowych

Acoustic performance of sandwich panels

Jacek Nurzyński

j.nurzynski@itb.pl

Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

Lekkie płyty warstwowe są stosowane głównie jako zewnętrzna obudowa obiektów przemysłowych i magazynowych. Płyta składa się ze sprężystego rdzenia i obustronnych, cienkich, metalowych okładzin. Tworzy to ustrój rezonansowy o słabej izolacyjności akustycznej. Celem pracy było zbadanie różnych czynników konstrukcyjnych mających wpływ na właściwości akustyczne płyty. Rozważano typ i właściwości izolacyjnego rdzenia, grubość płyty i fałdowanie metalowych okładzin. Studium zostało przeprowadzone na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Analizowano kilkanaście modeli płyt warstwowych o różnej konstrukcji. Rdzeń był wykonany z pianki poliuretanowej (PUR), wełny mineralnej (MW) i styropianu (EPS). Uwzględniono panele ściennie o grubości 40 mm, 80 mm, 100 mm, 200 mm, oraz płyty dachowe o grubości 40 mm, 100 mm, 120 mm. Analiza wykazała, że na właściwości akustyczne płyt wpływał rodzaj rdzenia, jego grubość i sztywność dynamiczna. Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej RA1 i RA2 były odpowiednio w zakresie (21-28) dB i (18-26) dB. Przesunięcie częstotliwości rezonansowej w kierunku pasm wysokich z reguły powodowało zwiększenie wskaźników jednoczłonowych. Mimo to, jakakolwiek znacząca poprawa izolacyjności akustycznej płyty bez zastosowania dodatkowych warstw izolacyjnych wydaje się wysoce wątpliwa.

Lightweight sandwich panels are basically used for an external envelope of industrial and warehouse buildings. The panel consists of a resilient core and thin metal facings on either side. This constitutes a resonant structure with poor sound insulation. The study aimed to investigate different constructional aspects affecting the acoustic performance of the panel. The type and properties of the insulating core, the panel thickness and the metal sheets corrugating were considered. The study was conducted on the basis of the laboratory tests results. Several models of sandwich panels of various structure were analyzed. The insulating core was made of polyurethane foam (PUR), mineral wool (MW) and polystyrene foam (EPS). The wall panels with a thickness of 40 mm, 80 mm, 100 and 200 mm, and roof panels 40 mm, 100 mm and 120 mm thick were considered. The analysis showed that the acoustic parameters were mainly affected by the type, thickness and dynamic stiffness of the panel's core. The values of RA1 and RA2 indices were within the range of (21-28) dB and (18-26) dB respectively. As a rule, the resonans frequency shifting towards high frequency bands resulted in a certain increase in single-number quantities. However, any significant improvemeny of the panels's sound insulation without additional insulating layers seems very questionable.

Wpływ pokrycia na parametry akustyczne wybranych materiałów porowatych i włóknistych

The impact of coverage on the acoustic parameters of selected porous materials

Adam Pilch, Olaf Krejczka

apilch@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Panele akustyczne bazujące na wypełnieniu włóknistym muszą być zabezpieczone przed uszkodzeniami mechanicznymi. Ważna jest również ochrona użytkownika przed pyleniem, którego źródłem może być materiał włóknisty (wełna skalna lub szklana). W panelach produkowanych indywidualnie z uwagi na szczególne walory estetyczne lub funkcjonalne, konieczny jest dobór alternatywnych pokryć w stosunku do stosowanych w ogólnodostępnych panelach, skąd wynikła konieczność analizy różnych materiałów, które mogłyby być zastosowane na pokrycia i określenia ich wpływu na właściwości akustyczne materiału bazowego. Badania przeprowadzono analitycznie, numerycznie oraz doświadczalnie na dwóch różnych materiałach porowatym i jednym włóknistym. Przeanalizowano 11 różnych pokryć w tym cztery nieprzepuszczające powietrza. Uzyskane wyniki pozwoliły na wykazanie wielkości wpływu materiału pokrycia na współczynnik pochłaniania dźwięku materiału bazowego oraz opracowanie zaleceń w zakresie doboru materiału pokrycia w zależności od materiału bazowego.

Acoustic structures based on fiber slabs must be protected from mechanical damage. It is also important to protect the user from dust, the source of which may be the fibrous material (rock or glass wool). In individually manufactured panels, due to special aesthetic or functional qualities, it is necessary to select alternative coverings to those used in publicly available panels, whence arose the need to analyze different materials that could be used for coverings and determine their effect on the acoustic properties of the base material. The study was carried out analytically, numerically and experimentally on two different porous materials and one fibrous material. Eleven different coverings were analyzed, including four impermeable ones. The results made it possible to demonstrate the magnitude of the effect of the covering material on the sound absorption coefficient of the base material and to develop recommendations for the selection of the covering material depending on the base material.

Narażenie zawodowe na hałas i hałas infradźwiękowy załóg jednostek żeglugi śródlądowej

Occupational exposure to noise and infrasonic noise of crews of inland waterway vessels

*Dariusz Pleban, Emil Kozłowski, Jan Radosz, Bartosz Ziółkowski
daple@ciop.pl*

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Statki, w tym jednostki pływające żeglugi śródlądowej, są szczególnymi miejscami pracy z dwóch zasadniczych powodów: funkcjonują one w nietypowym środowisku i charakteryzują się ograniczoną przestrzenią. W związku z tym warunki pracy na jednostkach żeglugi śródlądowej należą do specyficznych. Na bezpieczeństwo pracy załóg tych jednostek mają wpływ m.in. zagrożenia związane z eksploatacją jednostek i ruchem innych statków oraz warunki pogodowe. Według danych literaturowych hałas i drgania mechaniczne dominują w grupie negatywnych czynników środowiska pracy na jednostkach pływających. W ramach realizowanego projektu, którego celem jest przeprowadzenie kompleksowej oceny zagrożeń i uciążliwości środowiskowych na wybranych jednostkach pływających, zrealizowano badania warunków pracy na jednostkach żeglugi śródlądowej. Badania te obejmowały pomiary i ocenę fizycznych czynników środowiskowych, w tym hałasu i hałasu infradźwiękowego na następujących typach jednostek żeglugi śródlądowej: łodziach policyjnych, łodziach ratowniczych, pchaczach i statkach turystycznych. Najwyższe wartości poziomów hałasu zarejestrowano w pomieszczeniach maszynowni na pchaczach. Zmierzone w tych pomieszczeniach równoważne poziomy dźwięku A były w przedziale od 101,1 do 102,2 dB. Z kolei najniższe wartości poziomów hałasu zarejestrowano na stanowiskach pracy sternika w kabinach sterowniczych na jednostkach turystycznych. Zmierzone na tych stanowiskach równoważne poziomy dźwięku A były w przedziale od 59,2 do 61,1 dB. W artykule przedstawiono szczegółowe wyniki pomiarów i oceny hałasu i hałasu infradźwiękowego na badanych jednostkach żeglugi śródlądowej.

Ships, including inland waterway vessels, are special places to work for two main reasons: they operate in an unusual environment and they are characterised by limited space. Therefore, the working conditions on inland waterway vessels are specific. The safety of the crews of these vessels is influenced by, inter alia, hazards related to the operation of vessels and the movement of other vessels, as well as weather conditions. According to literature data, noise and mechanical vibrations dominate in the group of negative factors of the working environment on vessels. As part of the project, which aims to carry out a comprehensive assessment of environmental hazards and nuisances on selected vessels, research on working conditions on inland waterway vessels was carried out. These researches included measurements and evaluation of physical environmental factors, including noise and infrasonic noise, on the following types of inland waterway vessels: police boats, rescue boats, pushers and tourist vessels. The highest noise levels were recorded in the engine room on pushers. The measured equivalent A-weighted sound pressure levels in these rooms

were in the range of 101.1 to 102.2 dB(A). On the other hand, the lowest noise levels were recorded at helmsman's workstations in control cabins on tourist vessels. The measured equivalent A-weighted sound pressure levels at these workplaces ranged from 59.2 to 61.1 dB(A). The article presents detailed results of measurements and assessment of noise and infrasonic noise on the tested inland waterway vessels.

Wpływ mikro-zmian w trajektorii szarpnięcia na dźwięk gitary akustycznej

The effect of micro-changes in the pluck trajectory on the sound of an acoustic guitar

Marek Pluta, Jan Jasiński, Daniel Tokarczyk, Julia Grygiel

pluta@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Referat przedstawia analizę wpływu mikro-zmian wprowadzanych do trajektorii szarpnięcia kostką na dźwięk gitary akustycznej. Korzystając z nowoczesnego, zrobotyzowanego mechanizmu szarpniącego, przeprowadzono serię pomiarów, w których kostka była stopniowo przesuwana w kierunku instrumentu z krokiem 192 mikrometrów, co skutkowało zwiększeniem głębokości ataku. Poddano analizie wpływ tych zmian na głośność, barwę, zawartość harmoniczną oraz sposób, w jaki dźwięk rozwija się podczas wybrzmiewania. Procedura ta była powtarzana dla kostek wykonanych z sześciu różnych materiałów aby zbadać, w jaki sposób sam materiał kostki wpływa na efekt zmiany trajektorii szarpnięcia. Wyniki badania wskazują, że przy małej głębokości struna nie jest w pełni pobudzona, co skutkuje słabym i wyraźnie zmienionym dźwiękiem. Zakres tego efektu zmienia się w zależności od właściwości mechanicznych materiału kostki. Po przekroczeniu tego zakresu dalszy wzrost głębokości skutkuje zwiększeniem głośności dźwięku, zmniejszeniem nieharmoniczności i szumów oraz zmianą barwy – dźwięk staje się pełniejszy w niskich częstotliwościach i bardziej szorstki. Wnioski z przeprowadzonej analizy pozwalają na wgląd w złożoną relację między trajektorią szarpnięcia a wytwarzanym dźwiękiem. Podkreślają również istotność szarpnięcia w metodyce testowania gitar, pokazując, że mechanika szarpania struny musi być uwzględniana przy prowadzeniu i interpretacji badań nad brzmieniem gitary.

This study explores how micro-changes in the plucking trajectory of a guitar pick influence the sound of an acoustic guitar. Using a state-of-the-art robotic plucker, a series of measurements has been performed, where the plectrum was moved towards the instrument by a step of 192 micrometers, resulting in an increased attack depth. It has been analysed how the effect of these changes is reflected in loudness, timbre, harmonic content and how the sound progresses during decay. This methodology has been repeated for guitar plectra made from six different materials to investigate how the pick itself influences the effect of a change in the plucking trajectory.

The results of the study show that at a low depth the string is not fully excited resulting in weak and markedly altered sound. The range of this effect changes with the mechanical properties of the plectrum material. After this range an increase in depth results in an increase in sound loudness, a decrease in inharmonicity and noisiness and a shift in timbre where the sound becomes fuller in low frequencies and rougher.

Presented findings help to understand the nuanced relationship between plucking trajectory and acoustic output. They provide important insights regarding the im-

portance of plucking in guitar testing methodologies, showing that the mechanics of plucking must be taken into account when conducting and interpreting results of guitar testing.

Analiza rozdzielczości techniki laserowo–ultradźwiękowej do inspekcji klejonych płyt aluminiowych

Resolution study of laser–ultrasound technique for disbonds detection in multilayered metallic structures

Patrycja Pyzik, Łukasz Ambroziński

pyzikip@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Ze względu na wysokie właściwości mechaniczne przy jednoczesnym zmniejszeniu masy, wielowarstwowe struktury metaliczne są coraz częściej stosowane jako elementy konstrukcyjne. Przykładem takich komponentów są klejone płyty aluminiowe, szeroko wykorzystywane w przemyśle lotniczym. Jednakże, inspekcja tego typu struktur przy użyciu metod nieniszczących wciąż stanowi wyzwanie. Tradycyjne badania ultradźwiękowe są trudne do interpretacji ze względu na liczne odbicia fal od kolejnych warstw. Laserowa ultrasonografia (LU) to w pełni optyczna, bezkontaktowa technika, umożliwiająca szybkie i efektywne badania. Wymuszenie wiązką lasera wzbudza fale w szerokim zakresie częstotliwości, a detekcja optyczna zapewnia wysoką rozdzielczość. Okazuje się, że w metalach fale poprzeczne mogą być efektywnie generowane w reżimie termo-sprężystym przy użyciu stosunkowo niskich energii lasera. Niniejsza praca przedstawia analizę rozdzielczości techniki wykorzystującej laserowo generowane fale poprzeczne do inspekcji klejonych płyt aluminiowych. W tym celu zastosowano symulacje numeryczne, uwzględniające sprzężone zjawiska fizyczne. Opracowany model dwuwarstwowej płyty aluminiowej, połączonej warstwą epoksydową, zawiera defekt w postaci szczeliny powietrznej symulującej delaminację. Aby ocenić rozdzielczość metody, przeanalizowano różne głębokości defektów. Wyniki symulacji porównano z eksperymentem przeprowadzonym na strukturze składającej się z trzech płyt aluminiowych połączonych warstwą epoksydową.

Multilayered metallic structures are increasingly used as construction elements due to their reduced weight while maintaining strong mechanical properties. Adhesively bonded aluminium plates are a common example, widely used in the aerospace industry. However, non-destructive inspection of these components remains challenging. Traditional ultrasonic scans are difficult to interpret due to multiple reflections and mode conversions at the layers. Laser ultrasound (LU) is a fully optical, non-contact technique that enables fast and efficient inspection. It generates a broad range of frequencies, while optical detection ensures high-resolution performance. Multiple wave modes are excited within the laser. Shear modes can be efficiently generated in the thermoelastic regime, using relatively low laser energies. In this paper, we analyse the resolution of a laser-generated shear wave technique for inspecting adhesively bonded aluminium plates. To achieve this, multiphysics finite-difference simulations are performed. A two-layer aluminium plate model, bonded with an epoxy film, is developed, incorporating a defect—an air gap simulating delamination—within the epoxy layer. Various defect depths are examined to evaluate the technique’s reso-

lution. The simulation results are validated through an experiment on a structure composed of three aluminium plates bonded with an epoxy film.

Experimental evaluation of resonator slits in cylindrical sonic crystal scatterers

Experimental evaluation of resonator slits in cylindrical sonic crystal scatterers

Jan Radosz

jarad@ciop.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

This study investigates the effects of resonator slits on sound attenuation in cylindrical sonic crystal scatterers through a combination of numerical simulations and experimental validation in an anechoic chamber. The research focuses on evaluating how slit size, shape, and surface coverage percentage influence sound transmission loss. Cylindrical scatterers with different slit geometries, including single vertical slits and multiple narrow perforations, were examined. Slit widths ranging from 5 mm to 30 mm, and open-area ratios between 5% and 40% of the scatterer surface were considered to analyze their impact on resonance frequencies and attenuation performance. Numerical simulations were conducted using COMSOL Multiphysics to model the acoustic behavior of slitted scatterers. The experimental results aligned well with numerical predictions, demonstrating that resonator slits in sonic crystal scatterers can significantly enhance sound attenuation by introducing locally resonant band gaps. The study highlights the potential for optimizing slit design to maximize insertion loss while maintaining airflow and structural integrity, making this approach valuable for applications in low-frequency noise barriers and metamaterial-based acoustic filters.

Weryfikacja numeryczna stanowiska do pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku

Numerical verification of a test stand for measuring the sound absorption coefficient

*Jarosław Rubacha**, *Artur Flach**, *Mykhaylo Melnyk***

jrubacha@agh.edu.pl

*AGH w Krakowie, **Lviv Polytechnic National University

W artykule przedstawiono wyniki analiz numerycznych stanowiska badawczego przeznaczonego do pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku przez materiały i ustroje akustyczne w zakresie niskich częstotliwości. W ramach przeprowadzonych badań numerycznych oceniono wpływ kluczowych parametrów konstrukcyjnych falowodu o przekroju prostokątnym na uzyskiwane wyniki współczynnika pochłaniania dźwięku. Analiza obejmowała weryfikację wpływu właściwości materiałowych ścian falowodu oraz obecność otworów i szczelin powietrznych pomiędzy elementami konstrukcyjnymi na propagację fali akustycznej.

Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwoliły na określenie najistotniejszych parametrów wpływających na wyniki pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku. Wyniki tych analiz mogą stanowić istotne wskazówki do konstrukcji tego typu stanowisk pomiarowych.

This paper presents the results of numerical analyses of a test stand designed to measure the sound absorption coefficient of materials and acoustic systems in the low-frequency range. The study assessed the impact of key structural parameters of a rectangular waveguide on the accuracy of the obtained results. The analyses included an evaluation of the influence of the material properties of the waveguide walls, as well as the presence of openings and air gaps between structural elements, on the propagation of acoustic waves.

The conducted numerical simulations enabled the identification of the most significant factors affecting measurement results, providing valuable insights for the design and optimization of such measurement setups.

Feature extraction and IMF selection using multivariate decomposition and GA for MAG welding quality assessment

Feature extraction and IMF selection using multivariate decomposition and GA for MAG welding quality assessment

Solomon Habtamu Tessema, Dariusz Bismor

stessema@polsl.pl

Silesian University of Technology

This study introduces a data-driven approach for evaluating weld quality in Metal Active Gas (MAG) welding by analyzing key parameters such as arc stability, defect detection, and variations in welding speed, voltage, and current. The methodology utilizes electret microphones, current sensors, and ADXL386 accelerometers to capture critical data during the welding process. Advanced signal processing techniques, specifically multivariate empirical mode decomposition (MEMD), are applied to analyze the time-frequency characteristics of the collected signals. MEMD is used to decompose the signals into intrinsic mode functions (IMFs), followed by a bandpass filter applied to each IMF for signal refinement. The filter parameters are optimized using a Genetic Algorithm (GA), which also selects the most effective IMFs. The GA's fitness function is designed to maximize energy and correlation coefficients while minimizing mean square error (MSE), ensuring optimal IMF selection for robust signal reconstruction. This approach enhances signal quality by achieving a high SNR, SDR, SINAD, and minimal root mean square error (RMSE). By assessing arc instabilities, detecting welding defects, and analyzing variations in welding speed and current, this methodology offers valuable insights for improving weld quality assessment.

Optimalizacja rozmiaru czujnika w piezoelektrycznym układzie hybrydowym czujnik–aktuator

Determining the optimal size of a sensor part of piezoelectric sensor–actuator hybrid

Roman Trojanowski

roman.cz.trojanowski@agh.edu.pl

AGH w Krakowie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz numerycznych dotyczących zagadnienia poszukiwania optymalnego rozmiaru czujnika dla piezoelektrycznego układu hybrydowego czujnik-aktuator. W poprzednich pracach autorzy przedstawili koncepcję takiej hybrydy, w którym wewnętrzna część pełniła funkcję czujnika, a zewnętrzna aktuatora. Przedstawiono w nich modele numeryczne dla hybryd o podstawie kwadratu i koła oraz obliczono redukcję poziomów drgań i hałasu. W tej pracy autorzy skupili się na poszukiwaniu optymalnego rozmiaru czujnika w hybrydowym elemencie piezoelektrycznym. Aby zapewnić zgodność z poprzednimi pracami, w programie ANSYS wykonano model MES stalowej płyty z przymocowanymi elementami piezoelektrycznymi i półkulą powietrza. Zarówno wymiary jak i parametry materiałowe zamodelowanych obiektów pozostały takie same jak w poprzednich pracach. Rozmiar wewnętrznej części hybrydowego czujnika-aktuatora jest podany jako procent powierzchni całego elementu piezoelektrycznego i wynosi od 5% do 90%. Do optymalizacji wybrano 2 kryteria: działanie czujnika w porównaniu do czujnika referencyjnego oraz jak skuteczna jest badany układ hybrydowy w redukcji drgań płyty w odniesieniu do standardowego aktuatora piezo elektrycznego. Aby sprawdzić te kryteria, przeprowadzono analizy harmoniczne dla pierwszego, drugiego, czwartego i piątego modu płyty. Funkcją celu była minimalizacja sumy wektorów przemieszczeń dla pewnej liczby węzłów. Rozpatrzono 2 przypadkami: liczba węzłów odpowiada wszystkim węzłom tworzące „tył” płyty lub liczba węzłów odpowiada węzłom tworzącym czujnik.

This work presents the results of numerical analyses of a search for an optimal sensor part size for a piezoelectric hybrid sensor-actuator. In previous works the authors presented the concept of a piezoelectric sensor-actuator, where the inner part of the hybrid would be used as a sensor, and the outer part as an actuator. Numerical models were presented for square and disc based hybrids and vibration and sound levels reduction were calculated. For this work authors focused on searching for optimal size on the sensor part of the hybrid piezo element. To ensure the compliance with the previous works a FEM model of a steel plate with piezo elements attached and a half ball of air were made using ANSYS software. The dimensions, material parameters used were the same as in previous works. The size of the inner part of the sensor actuator hybrid are given as a percentage of the area of the whole piezo element and range from 5% to 90%. There were 2 criteria chosen for the optimization: how well the sensor works compared to the reference sensor, and how efficient the hybrid compared to standard actuator in vibration reduction. To check those criteria harmonic analyses were performed for the 1st, 2nd, 4th and 5th mode

of the plate. The goal function was the minimalization of displacement vector sum of a number of nodes with 2 possible cases: number of nodes being all the nodes making the back area of the plate, or number of nodes equal to the nodes corresponding to the sensor part.

Wpływ połączenia przegrody masywnej ze ścianą wykonaną na bazie płyt gipsowo-kartonowych na przenoszenie boczne dźwięku z wykorzystaniem metody statystycznej analizy energii

The impact of the connection between a massive partition and a wall made of gypsum plasterboards on the flanking sound transmission using the SEA method

Agnieszka Wójtowicz, Tadeusz Kamiński, Jarosław Rubacha

a.wojtowicz.23@gmail.com

AGH w Krakowie

Boczne przenoszenie dźwięku jest jednym z najistotniejszych problemów w procesie projektowania przegród budowlanych, prowadzącym do ryzyka utraty izolacji akustycznej ścian i stropów. Literatura przedmiotu wskazuje, że różnica między określoną przez producenta systemów ściennych lub obliczoną zgodnie z prawem masy teoretyczną wartością izolacyjności akustycznej a analogicznym parametrem, uzyskanym na drodze pomiarów akustycznych, potrafi sięgać od kilku do nawet kilkunastu decybeli. Z tego powodu oszacowanie wypadkowej izolacyjności akustycznej przegrody z uwzględnieniem połączonych z nią przegród sąsiednich jest kluczowe już na wczesnym etapie projektowania, tak aby zapewnić spełnienie wymagań przytoczonych w zaleceniach normowych lub literaturze. Obecnie istnieją regulacje i opracowania, które zawierają wskazówki dotyczące obliczania szacowanego spadku izolacyjności akustycznej ze względu na przenoszenie boczne. W praktyce zdarzają się jednak sytuacje, które nie zostały do tej pory opisane w normach oraz literaturze. Przykładem są przegrody wykonane na bazie płyt gipsowo-kartonowych, które w Polsce są jednymi z najczęściej spotykanych typów ścian działowych, a nie są uwzględnione w obowiązujących procedurach normatywnych. Nie są także częstym przedmiotem opracowań naukowych. Niniejsze badanie ma na celu zgłębienie tego tematu poprzez analizę wpływu połączenia przegrody masywnej ze ścianą wykonaną w systemie opartym na płytach gipsowo-kartonowych z wykorzystaniem metody statystycznej analizy energii (SEA). Porównane zostaną wyniki dla systemów z pojedynczym i podwójnym obustronnym płytowaniem, z wykorzystaniem wypełnienia materiałem tłumiącym oraz bez, a także dla różnych typów połączeń ścian wykonanych w technologii lekkiej z przegrodą masywną (połączenie narożne, w kształcie litery X oraz w kształcie litery T).

Flanking sound transmission is one of the most significant challenges in the process of designing building partitions, leading to the risk of sound insulation loss of walls and ceilings. The literature indicates that the difference between the theoretical acoustic insulation value specified by wall system manufacturers or calculated according to the mass law and the corresponding parameter obtained through acoustic measurements can range from a few to even several decibels. For this reason, estimating the overall acoustic insulation of a partition, considering its connections to adjacent partitions, is crucial at an early design stage to ensure compliance with the requirements outlined in normative recommendations or literature. Currently,

there are regulations and studies that contain guidelines for calculating the estimated decrease in sound insulation due to flanking transmission. In practice, however, there are situations that have not been described in standards or literature so far. One example is partitions made of gypsum board systems, which are among the most commonly used types of partition walls in Poland but are not included in existing normative procedures. They are also not a frequent subject of scientific studies. This research aims to explore this issue by analyzing the impact of connecting a massive partition with a wall constructed using a gypsum board system, employing the Statistical Energy Analysis (SEA) method. The study will compare results for systems with single and double-sided cladding, with and without sound-absorbing material, as well as for various types of connections between lightweight walls and massive partitions (corner connection, X-shaped connection, and T-shaped connection).

Weryfikacja doświadczalna źródeł hałasu rekreacyjnego w odniesieniu do zaleceń Światowej Organizacji Zdrowia dla obszaru Europy

Experimental verification of leisure noise sources in relation to the World Health Organization recommendations for the European Region

*Tadeusz Wszolek**, *Gabriela Szmyd***

twszolek@agh.edu.pl

*AGH w Krakowie, **Eco Sound

Wg poradnika Światowej Organizacji Zdrowia dla Regionu Europy głównym źródłem narażenia na hałas rekreacyjny jest słuchanie głośniej muzyki poprzez indywidualne urządzenia odsłuchowe. W wyniku licznych badań jednoznacznie potwierdzających negatywne skutki nadmiernej ekspozycji na tego rodzaju hałas, przyjęto że średnia roczna ekspozycja na hałas rekreacyjny $LA_{eq,24h}$ od wszystkich wydarzeń, nie powinna przekraczać 70 dB. O ile narażenie na słuchanie głośnej muzyki z indywidualnych urządzeń odsłuchowych jest dość dobrze udokumentowane, o tyle narażenie na hałas uczestników innych wydarzeń artystycznych, sportowych, czy jeszcze innych form rekreacji jest dość słabo rozpoznane. Dlatego w ramach niniejszego artykułu zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych narażenia na hałas wybranych wydarzeń artystycznych (koncertów muzycznych), sportowych (mecz piłki nożnej), rekreacyjnych i innych głośnych wydarzeń, a uzyskane rezultaty odniesiono do wyników badań ankietowych 19 osób, uczestników wydarzeń o podobnym charakterze. Przy czym dane odnośnie hałasu wydarzeń i czynności, których nie badano w ramach niniejszej pracy, zaczerpnięto z literatury. Obliczone średnie w ciągu roku dobowe poziomy $LA_{eq,24h}$ ankietowanych osób wahają się w przedziale od 63 dB do ponad 75 dB, przy czym w przypadku 15 uczestników zanotowano przekroczenia wartości 70 dB, a największy wpływ na ten poziom miało uczestnictwo w koncertach i dyskotekach oraz słuchanie muzyki na indywidualnych urządzeniach odsłuchowych.

According to the World Health Organization's guide for the European Region, the main source of exposure to leisure noise is listening to loud music through individual listening devices. As a result of numerous studies clearly confirming the negative effects of excessive exposure to this type of noise, it was assumed that the average yearly exposure to recreational noise $LA_{eq,24h}$ from all events should not exceed 70 dB. While exposure to listening to loud music from individual listening devices is quite well documented, exposure to noise of participants in other artistic, sports or other forms of recreation is quite poorly recognized. Therefore, this article presents the results of experimental studies of exposure to noise of selected artistic events (music concerts), sports (football match), recreational and other loud events, and the obtained results were compared to the results of surveys of 19 people, participants of events of a similar nature. Data on the noise of events and activities that were not studied in this work were taken from the literature. The calculated average yearly

daily levels of LAeq,24h among the surveyed persons range from 63 dB to over 75 dB, with 15 participants recording exceedances of 70 dB, and this level was mainly influenced by participation in concerts and discos as well as listening to music on individual listening devices.

Streszczenia prac konkursowych

Badanie skuteczności indywidualnych ochronników słuchu

A research on the effectiveness of individual hearing protectors

Anna Frączkowska, Maurycy Kin

anna.m.fraczkowska@gmail.com

Politechnika Wroclawska

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

The aim of the study is to investigate the effectiveness of individual hearing protectors, specifically passive earmuffs. Two research methods were developed to assess the attenuation of the protectors in both objective and subjective ways. The main parameter measured was the attenuation of the earplugs, calculated as the algebraic difference between the values measured without and with the protector. To perform the objective measurements, two test signals were used: pink noise filtered through third-octave bands and a sinusoidal signal. Objective measurements were carried out using an artificial head phantom, which allowed for proper placement of the earplug in the ear canal. Subjective measurements were performed through audiometric tests. The test signals used for the study were standard sinusoidal signals taken from the norm for this type of measurement. The obtained results showed significant discrepancies between the objective method and both types of test signals. However, the subjective test results showed values most closely matching those provided by the manufacturers of the protectors.

Projekt soczewki akustycznej

Acoustic lens design

Jadwiga Hyla, Jarosław Rubacha

hylajadwiga@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Soczewki akustyczne to struktury umożliwiające skupienie przenikających przez nie fal akustycznych. Powszechnie znajdują zastosowanie w medycynie, szczególnie w zakresie manipulowania falami ultradźwiękowymi. W artykule przedstawiono problematykę projektowania soczewek dedykowanych dla zakresu częstotliwości słyszalnych, gdzie konieczne jest uwzględnienie większych długości fal akustycznych, a tym samym znacznie większych wymiarów struktury. Zaproponowano wykorzystanie periodycznie rozmieszczonych komórek akustycznych, umożliwiających kontrolę współczynnika przenikania dźwięku oraz opóźnienia fazowego fali przenikającej. Przeprowadzono parametryzację pojedynczej komórki akustycznej oraz optymalizację całej struktury soczewki z zastosowaniem algorytmu roju cząstek (PSO). Ostatecznym rezultatem prac jest projekt soczewki o założonych właściwościach akustycznych, umożliwiający skuteczną manipulację falą akustyczną w zakresie częstotliwości słyszalnych.

Acoustic lenses are structures that enable the focusing of sound waves passing through them. They are commonly used in medicine, particularly for manipulating ultrasonic waves. This article addresses the challenges of designing lenses for audible frequency ranges, where larger acoustic wavelengths necessitate significantly larger structural dimensions. The proposed approach involves the use of periodically arranged acoustic cells, which allow for control over the sound transmission coefficient and the phase delay of the transmitted wave. A parametrization of a single acoustic cell was conducted, followed by the optimization of the entire lens structure using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The final outcome of this work is an acoustic lens design with the intended acoustic properties, enabling effective manipulation of sound waves within the audible frequency range.

Badanie możliwości łączenia pojedynczych metamateriałów membranowych w wielokomórkowe ustroje do zwiększania izolacyjności akustycznej

Examination of the possibility of combining individual membrane metamaterials into multi-cellular structures to enhance acoustic insulation

Sara Kopeć, Klara Chojnacka

sarakopec@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Membranowe struktury rezonansowe, czyli metamateriały membranowe, to nowoczesne rozwiązanie w izolacji akustycznej, szczególnie dla niskich częstotliwości. W przeciwieństwie do tradycyjnych materiałów, pozwalają na skuteczne tłumienie dźwięku bez znacznego zwiększania masy. W pracy opracowano i zweryfikowano model numeryczny opisujący ich zachowanie oraz metody modyfikacji charakterystyki tłumienia. Szczególną uwagę poświęcono układom wielokomórkowym, poszerzającym zakres tłumienia. Założenia teoretyczne zweryfikowano eksperymentalnie w rurze impedancyjnej zgodnie z normą ASTM E2611-09, porównując wyniki z modelem numerycznym.

Membrane resonant structures, known as membrane metamaterials, offer an innovative solution for acoustic insulation, especially at low frequencies. Unlike traditional materials, they enable effective sound attenuation without significantly increasing mass. This study develops and validates a numerical model describing their behavior and explores methods for modifying transmission loss characteristics. Special attention is given to multi-cell configurations that expand the effective attenuation range. Theoretical assumptions were experimentally verified using an impedance tube following ASTM E2611-09, with results compared to numerical predictions.

Wpływ maskowania sygnałów dźwiękowych na zapamiętywanie wysokości dźwięku

Effect of signal masking on pitch memorization

Dominika Kuczak, Maurycy Kin

dominika.kuczak@outlook.com

Politechnika Wroclawska

Percepcja wysokości dźwięku stanowi proces, którego mechanizmy nie zostały dotychczas w pełni wyjaśnione. Dotychczas dominują dwie główne teorie: teoria czasu oraz teoria miejsca. Innym istotnym mechanizmem obserwowanym u człowieka jest zjawisko maskowania. Przeprowadzono zatem badanie obu tych procesów polegające na analizie wpływu maskowania na zapamiętywanie tonów prostych. Eksperyment polegał na zapamiętywaniu generowanych tonów o trzech różnych częstotliwościach. Były one maskowane trzema typami sygnałów szumowych. Badanie przeprowadzono przy użyciu słuchawek, gdzie na oba kanały podano ten sam sygnał. Wyniki badania wskazują, że wraz ze wzrostem częstotliwości generowanych tonów obniża się dokładność ich dostrajania. Analiza wykazała również, że szum różowy i szum biały w większym stopniu wpływają na proces zapamiętywania wysokości tonów niż szum kafeterii. Jednakże przeprowadzona analiza statystyczna sugeruje, że wpływ maskowania nie jest znacząco istotny.

Pitch perception is a process whose mechanisms have not yet been fully elucidated. So far, two main theories prevail: the theory of time and the theory of place. Another important mechanism observed in humans is the phenomenon of masking. Thus, a study of both processes was conducted to analyze the effect of masking on the memorization of simple tones. The experiment consisted of memorizing generated tones of three different frequencies. These were masked with three types of noise signals. The test was conducted using headphones, where the same signal was applied to both channels. The results of the test show that as the frequency of the generated tones increases, the accuracy of their tuning decreases. The analysis also showed that pink noise and white noise affect the pitch memory process more strongly than cafeteria noise. However, the statistical analysis conducted suggests that the effect of masking is not significant.

Projektowanie i analiza dźwiękoizolacyjnych metamateriałów akustycznych typu soft solid z wtrąceniami periodycznymi

Design and analysis of sound insulations soft-solid metamaterials with periodic inclusions

Agata Maciuszek, Klara Chojnacka

amaciuszek@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Metamateriały wibroakustyczne mogą przyjmować różne formy i mieć różnorodne zastosowania, takie jak zwiększenie izolacyjności akustycznej w zakresach, w których przy użyciu tradycyjnych materiałów jednorodnych nie jest możliwe uzyskanie wystarczającej skuteczności. W celu osiągnięcia tego efektu, aby wpłynąć na fale rozchodzące się w elemencie podstawowym, rozmieszczane są w regularnych odstępach na dostępnej przestrzeni elementy rezonansowe. W pracy skupiono się na analizie metamateriału wibroakustycznego typu soft solid z periodycznymi wtrąceniami – strukturze złożonej z materiału porowatego oraz cyklicznych aluminiowych elementów. W ramach prac wykonany został model w programie COMSOL, który uwzględnia interakcję domeny akustycznej z ciałem stałym. Analizie poddano wpływ zmian parametrów materiałowych oraz geometrycznych na efektywność struktury. Bazując na wynikach symulacji wykonano prototyp struktury objętej opracowaniem, dla którego następnie przeprowadzono pomiary izolacyjności akustycznej w polu rozproszonym.

Metamaterials have many different forms and purposes. They are able to significantly increase the acoustic insulation in the low frequency range, compared to the traditional materials. To achieve such goal, periodic resonators are placed in the appropriate distances on the available surface. The goal of this paper was to analyse vibroacoustic metamaterial which consists of a soft solid plane with solid inclusions embedded in. The structure consists of porous material and solid periodic elements which allow to enhance the insulation properties of the structure. Model of the structure which takes into account interactions between acoustic domain and a solid, was created using the software COMSOL. Influence of modifying material and geometrical parameters, such as thickness of the porous material, shape of the inclusions, on the effectiveness of the structure was studied. Materials with suitable parameters were selected, based on the results of the simulations, and with them created the prototype of the metamaterial. The acoustic insulation of the constructed structure was then measured in the diffuse field.

Wyniki pomiarów pilotażowych hałasu w wybranych pomieszczeniach szpitalnych

Results of pilot measurements of noise in selected hospital rooms

Aleksandra Sawczuk, Jadwiga Hyla, Wiktoria Potoniec, Wojciech Kotala, Tadeusz Wszolek

asawczuk@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Hałas w środowisku szpitalnym, generowany przez aparaturę medyczną, rozmowy personelu, a także działające urządzenia technologiczne, stanowi przeszkodę w efektywnym powrocie do zdrowia przebywających tam chorych. Długotrwałe narażenie pacjentów na nadmierny hałas może prowadzić do zaburzeń snu, stresu oraz utrudniać rekonwalescencję po zabiegach medycznych. W związku z tym zapewnienie odpowiedniego poziomu hałasu w szpitalach jest istotnym krokiem w kierunku poprawy komfortu pacjentów i efektywności leczenia. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań akustycznych przeprowadzonych w jednym z krakowskich szpitali, mających na celu ocenę poziomów hałasu w różnych pomieszczeniach, takich jak sale chorych oraz punkty pielęgniarstwa i wskazanie ich głównych źródeł. Podstawą analizy są wyznaczone poziomy równoważne, maksymalne oraz poziomy statystyczne poziomów ważonych A w ciągu doby. Przedstawiono również propozycje dalszych etapów prac nad projektem.

Noise in the hospital environment, generated by medical equipment, staff conversations, as well as operating technological equipment, is an obstacle to the effective recovery of patients who reside there. Prolonged exposure of patients to excessive noise can lead to sleep disorders, stress and impede recovery from medical procedures. Therefore, ensuring adequate noise levels in hospitals is an important step toward improving patient comfort and treatment efficiency. This paper will present the results of an acoustic study conducted at a Krakow hospital to assess noise levels in various rooms, such as patient rooms and nursing stations. The paper will present an analysis of equivalent, maximum and statistical levels per day. At the end, there will also be a discussion of the next steps for the project.

Prace konkursowe

Badanie skuteczności działania indywidualnych ochronników słuchu

Anna Frączkowska, Maurycy Kin

anna.m.fraczkowska@gmail.com

Politechnika Wroclawska

Abstract Niniejszy artykuł przedstawia zagadnienie zbadania skuteczności pasywnych wkładek przeciwhałasowych. Opracowano dwie metody badawcze: obiektywną i subiektywną. Tłumienie wkładki określano jako algebraiczną różnicę wartości zmierzonych bez ochronnika i z ochronnikiem. W pomiarach obiektywnych zastosowano dwa sygnały: szum różowy filtrowany pasmami tercjowymi oraz sygnał sinusoidalny, a badanie przeprowadzono na fantomie sztucznej głowy, co umożliwiło właściwe umieszczenie wkładki w kanale słuchowym. Pomiaru subiektywne wykonano jako badania audiometryczne wykorzystując standardowe sygnały sinusoidalne, zgodnie z normą dotyczącą tego typu pomiarów. Wyniki metody obiektywnej wykazały duże rozbieżności, natomiast badania subiektywne były najbardziej zbliżone do wartości podawanych przez producentów.

1. Wstęp

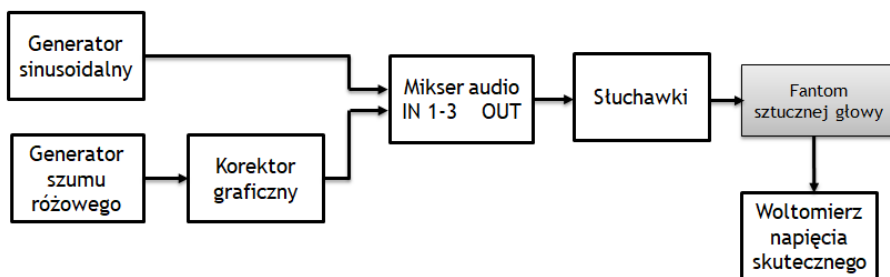
Narząd słuchu umożliwia percepcję świata, a w jego skład wchodzi: ucho zewnętrzne, środkowe i wewnętrzne, zawierające komórki nerwowe przekazujące bodźce do kory słuchowej, gdzie tworzy się wrażenie słuchowe. Jego cechą jest wysoka czułość i duży zakres dynamiki [8]. W niniejszej pracy istotnym aspektem jest głośność dźwięku oraz percepcja głośności sygnału. Głośność to prosta cecha wrażeniowa, co oznacza, że można ją opisać wielkością fizyczną - w tym przypadku jest to ciśnienie akustyczne. Dolną granicę pola słuchowego u człowieka w zakresie głośności stanowi tzw. próg słyszalności (próg detekcji sygnału) [2]. Próg słyszenia jest zależny od częstotliwości, a ludzkie ucho jest najczulsze na dźwięki w zakresie 1000 - 4000 Hz. Na górnej granicy pola słuchowego znajduje się próg dyskomfortu i bólu. Próg dyskomfortu to poziom dźwięku osiągający ok. 100 - 110 dB SPL, a próg bólu wynosi powyżej ok. 120 dB SPL [5]. Do obiektywnej oceny głośności dźwięku wprowadzono pojęcie poziomu głośności oraz krzywej izofonicznej. Poziom głośności porównuje dany ton z wzorcowym (1000 Hz), a dźwięki o tej samej głośności łączy linia izofony [8]. Z racji tego, iż izofony nie są płaskimi liniami, zachodzi potrzeba odpowiedniego uwzględnienia charakterystyki częstotliwościowej ucha dla różnych poziomów ekspozycji, czego przykładem mogą być filtry korekcyjne, choćby do pomiaru poziomu dźwięku w dBA.

Narząd słuchu jest organem podatnym na uszkodzenia, które mogą nieść trwałe skutki, dlatego powstały indywidualne ochronniki słuchu, które mogą pomóc chronić słuch. Wśród nich wyróżniamy nauszники przeciwhałasowe oraz wkładki przeciwhałasowe, które są indywidualnymi ochronnikami słuchu. W niniejszej pracy skupiono się jedynie na wkładkach pasywnych, których skuteczność tłumienia można rozpatrywać jako tłumienie ekranu akustycznego lub jako tłumienność wtrąceniową, polegającą na wprowadzeniu do ośrodka materiału o innej impedancji akustycznej, na wzór pomiarów teletransmisyjnych [6]. Przyjęcie jako miary skuteczności tłumienności wtrąceniowej pozwoliłoby na optymalizację tłumienia już na drodze wyboru lub zmiany struktury materiału, z którego wykonuje się wkładki.

W pracy przedstawiono wyniki badań nad skutecznością tłumienia wkładek do usznych za pomocą fantomu sztucznej głowy, przy zastosowaniu dwóch typów sygnałów: pobudzenia szumowego oraz z wykorzystaniem sygnału sinusoidalnego. Do badań wybrano trzy modele: Loop Experience 2 Plus, Bollszen Life+ oraz Alpine PartyPlug.

2. Metodyka badań

Badanym parametrem ochronników słuchu jest tłumienie dźwięku. Jest ono wyznaczane jako różnica dla danego sygnału testowego, między progiem słyszenia osoby badanej bez i z ochronnikiem słuchu, wyrażana w decybelach [7]. Jest to więc wartość mierzona subiektywnie, przy udziale słuchacza. W niniejszej pracy zaproponowano i porównano dwie metody pomiaru tego parametru – obiektywną i subiektywną. Metoda obiektywna zakładała wykorzystanie fantomu sztucznej głowy, który zawierał model kanału słuchowego ucha zewnętrznego i zastosowanie dwóch sygnałów pomiarowych – sygnału sinusoidalnego i szumu różowego filtrowanego pasmami tercjowymi o częstotliwościach środkowych kolejno: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz. Jest to sygnał podawany przez normę PN-EN ISO 4869-1, używany w celu subiektywnego określenia tłumienia dźwięku. Układ pomiarowy przedstawiono na Rys. 4. Składał się on z generatora sygnału sinusoidalnego, generatora szumu różowego, z którego następnie sygnał podawany był na korektor. Sygnały pomiarowe przekazywane były na wejścia miksera audio, z którego sygnał trafiał na słuchawki zamknięte, które nakładane były na fantom sztucznej głowy. Wewnątrz modelu kanału ucha zewnętrznego znajduje się mikrofon. Dzięki podłączeniu woltomierza napięcia skutecznego, można było odczytywać poziom sygnału odpowiadający wartości poziomu ciśnienia w kanale ucha zewnętrznego fantomu. W celu sprawdzenia wpływu dopasowania wkładki do wejścia kanału, dla sygnału szumu różowego, pomiarów dokonano dwukrotnie dla ucha bez oraz z wkładką przeciwhałasową. Dla sygnału sinusoidalnego pomiary wykonano jednokrotnie.



Rysunek 1: Układ pomiarowy

Pomiary tłumienia wkładek przeciwhałasowych metodą subiektywną zrealizowano wykonując na słuchaczach badanie PTA - Pure Tone Audiometry. Zostało ono przeprowadzone w kabinie odsłuchowej Katedry Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów Politechniki Wrocławskiej. Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano audiometr Maico MA52. Każdy słuchacz otrzymał instrukcję przebiegu badania i przeszedł próbny pomiar. Początkowo wykonywano pomiar bez ochronnika, a następnie wprowadzano dany model wkładki do kanału słuchowego. Częstotliwości pomiarowe były zgodne z zalecanymi w normie dotyczącej subiektywnego badania tłumienia ochronników słuchu [1], sygnałem testowym był sygnał sinusoidalny.

3. Wyniki pomiarów

3.1. Pomiary obiektywne

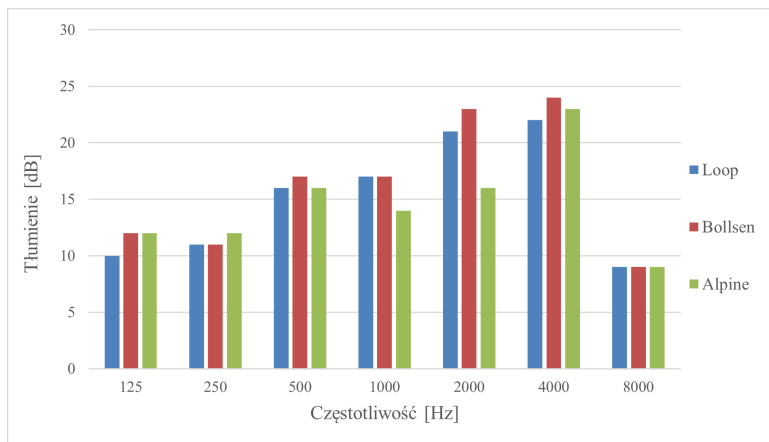
Pierwszym użytym sygnałem pomiarowym był szum różowy. By wyliczyć wartość tłumienia wkładki przeciwhałasowej odejmowano poziom napięcia zmierzony z ochronnikiem od zmierzonego poziomu napięcia bez ochronnika. Wyniki zaprezentowano w Tabeli 1.

Tabela 1: Wyniki pomiarów dla szumu różowego filtrowanego pasmami tercjowymi

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

Jak można zauważyć, różnice pomiędzy pomiarem pierwszym i drugim nie przekraczały 3 dB, za wyjątkiem częstotliwości środkowej 1 kHz, gdzie wynosiły 4 dB dla każdego modelu wkładki. Większe tłumienie zaobserwowano także w przypadku drugiego pomiaru. Wynikać to może z lepszego dopasowania ochronnika do modelu kanału słuchowego, wskutek wstępnego jej ukształtowania podczas pierwszego pomiaru. Dodatkowo na wykresie tłumienia w funkcji częstotliwości (Rysunek 2) można zauważyć, że łącząc wartości zmierzone otrzymano by kształt przypominający odwrotność krzywej izofonicznej.

Drugim wykorzystanym sygnałem pomiarowym był sygnał sinusoidalny o częstotliwościach takich samych, co środkowe pasm szumu. Wyniki pomiarów tłumienia przedstawiono w Tabeli 2.



Rysunek 2: Wartości tłumienia przy pierwszym pomiarze dla szumu różowego

Tabela 2: Wyniki pomiarów dla sygnału sinusoidalnego

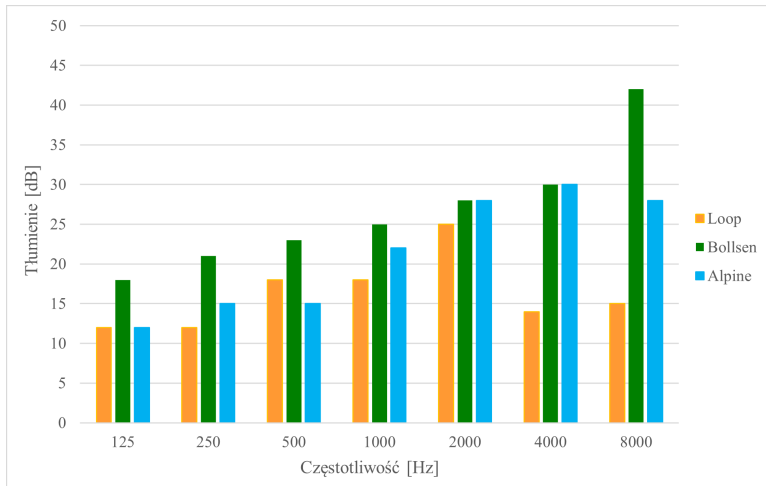
Częstotliwość [Hz]		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tłumienie [dB]	Loop	26	23	29	20	28	25	0
	Bollsen Life+	27	24	29	21	27	27	3
	Alpine	24	24	25	19	21	31	2

3.2. Pomiary subiektywne

Przeprowadzane pomiary były wykonane najpierw bez wkładki, aby upewnić się, czy słuchacz nie posiada dużych ubytków słuchu. Ponieważ ubytki słuchu u badanych pozwalały na zakwalifikowanie ich jako osoby otologicznie zdrowe (ubytki nie większe od 15 dB HL), wszystkie osoby zostały zakwalifikowane do przeprowadzenia badań audiometrycznych z użyciem ochronników. Po wykonaniu pomiaru progu słyszenia, aplikowano ochronnik do przewodu słuchowego i powtarzano badanie. Pomiary zostały wykonane dla jednego ucha u każdej osoby badanej.

Tłumienie wkładki obliczono w taki sam sposób, jak dla pomiarów obiektywnych, tzn. jako różnicę między wartościami progowymi zmierzonymi dla słuchacza z wkładką i bez wkładki. Uśrednione dla wszystkich słuchaczy wyniki pomiarów przedstawiono na Rysunku 3.

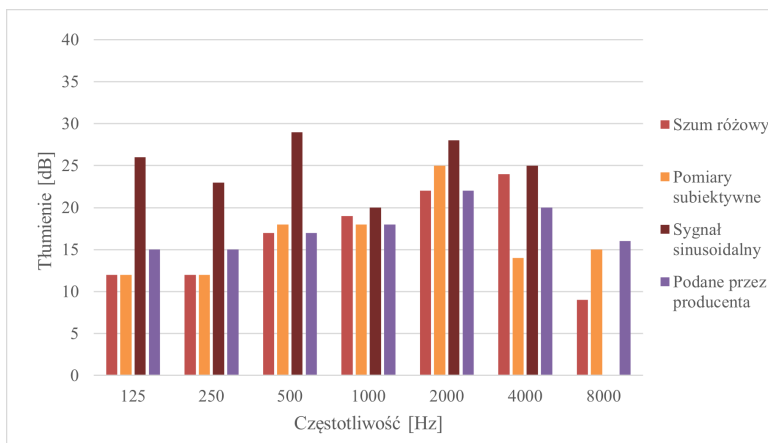
Różnice w wartościach progowych wszystkich badanych dochodziły do 15 dB, co mogło być spowodowane niedokładnym zaaplikowaniem wkładki lub też różnicami w wartościach progowych. Natomiast oczywistym wydaje się fakt, że dla każdego z badanych słuchaczy wprowadzenie ochronnika słuchu do wnętrza przewodu słuchowego spowodowało podwyższenie progu słyszenia.



Rysunek 3: Porównanie uśrednionych wartości tłumienia dla wszystkich słuchaczy

4. Omówienie wyników

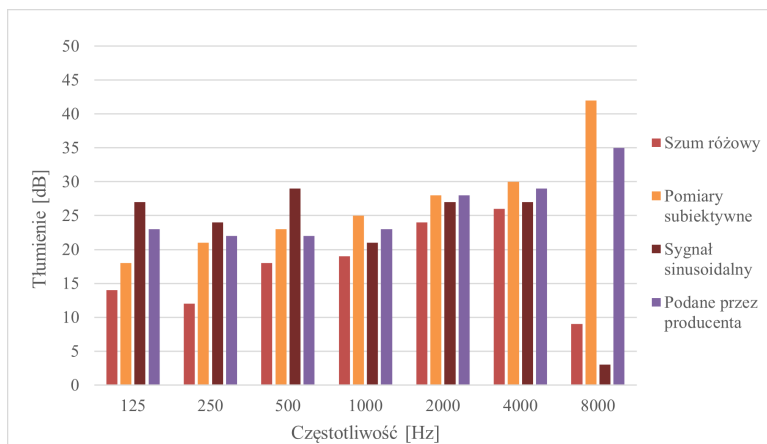
W celu porównania wyników badań zestawiono wartości tłumienności uzyskane w pomiarach obiektywnych (przy pomocy sygnałów sinusoidalnych i szumowych) oraz subiektywnych. Dodatkowo porównano otrzymane wyniki z wartościami podanymi przez producentów poszczególnych wkładek. Wyniki przedstawiono na Rysunkach 4 – 6.



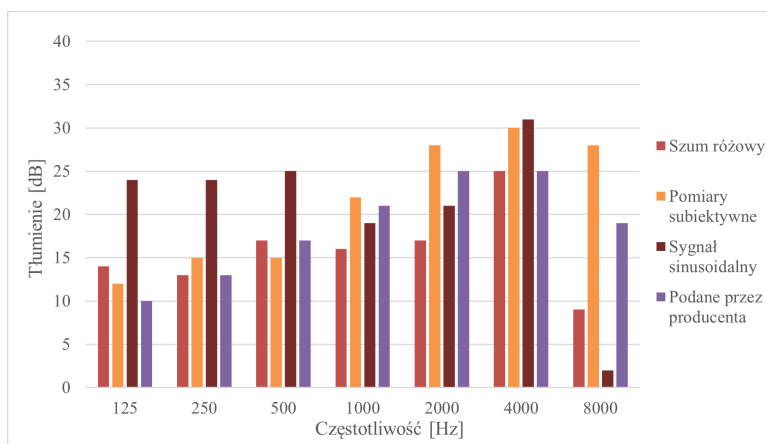
Rysunek 4: Porównanie wyników – Loop Experience 2 Plus

We wszystkich przypadkach można zauważyć, że wartości tłumienia otrzymane w metodzie obiektywnej dla sygnałów sinusoidalnych znacząco odbiegają od pozostających

stałych – różnice wynoszą 12 dB. Innym ciekawym zjawiskiem jest występowanie rozbieżności wyników pomiarów obiektywnych z wartościami podanymi przez producentów oraz zmierzonymi audiometrycznie dla częstotliwości 8 kHz, gdzie różnice dochodzą do 30 dB. Rozbieżności mogły być spowodowane zjawiskami falowymi dla tego zakresu częstotliwości, ze względu na długość kanału słuchowego stosowanego fantomu głowy.



Rysunek 5: Porównanie wyników – Bollsén Life+



Rysunek 6: Porównanie wyników – Alpine PartyPlug

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że dla częstotliwości 125-4000 Hz najbardziej zbliżone do danych fabrycznych uzyskano w badaniach subiektywnych - różnice dla wszystkich wkładek nie przekraczały 7 dB. Nieco większe różnice w wartościach tłumienia otrzymano dla pomiarów przy użyciu sygnałów szumowych – do

12 dB, natomiast pomiary z wykorzystaniem sygnału sinusoidalnego wykazują największą dyspersję wyników dla częstotliwości do 500 Hz. Można zatem stwierdzić, że wykorzystanie tego rodzaju sygnału w przypadku zastosowanego fantomu nie jest zalecane.

Reasumując uzyskane wyniki zaproponowana metoda obiektywna, która zakładała przeprowadzenie pomiarów na modelu kanału słuchowego ucha zewnętrznego za pomocą pobudzenia szumowego, dała wartości tłumienia wkładek zbieżne dla niektórych częstotliwości poniżej 8 kHz.

5. Podsumowanie

Wyniki tłumienia uzyskane metodą subiektywną są najbardziej zbieżne z danymi producentów, jednak do pomiarów przemysłowych weryfikujących skuteczność tłumienia wkładek metoda ta nie za bardzo się nada ze względu na czasochłonność i wysokie koszty badań. Można zatem wykorzystać metodę pomiarów opartą o pobudzenie sygnałem szumowym, dającą zbliżone wartości tłumienia. Rozbieżności mogą wynikać z niedokładnego dopasowania wkładki, kluczowego dla skuteczności ochronnika [7].

Uzyskane rezultaty są jednak zbieżne z wynikami badań, w których wykorzystano kontrolę dopasowania badanej wkładki [3], gdzie kształt krzywej tłumienia w zależności od częstotliwości również przypomina odwróconą izofonę, co korzystnie wpłynęłoby na skuteczność obniżenia poziomu dźwięku przy błonie bębenkowej, zwłaszcza w przypadku udziału w imprezach masowych [4][9].

Interesujące wydaje się zaadaptowanie teorii dotyczącej tłumienności wtrąceniowej i skutecznej stosowanej w układach teletransmisyjnych [6]. Wykorzystanie tłumienności wtrąceniowej, opartej na zmianie impedancji ośrodka, pozwoliłoby na ułatwienie procesu kontroli parametrów oraz konstruowania nowych wkładek.

Dla częstotliwości 8000 Hz uzyskano wartości tłumienia mocno odbiegające tak od oczekiwanych, jak i podawanych przez producentów, jednak przyczyna tego zjawiska wymaga dokładniejszych badań i analiz, którymi autorzy zamierzają zająć się w przyszłości.

Bibliografia

- [1] PN-EN ISO 4869-1:2018-12, *Akustyka. Ochronniki słuchu. Część 1: Metoda subiektywna pomiaru tłumienia dźwięku*.
- [2] K. Dajos-Krawczyńska, *Dyskryminacja słuchowa w zakresie częstotliwości, intensywności i czasu trwania dźwięku – podstawy teoretyczne – przegląd literatury*, Nowa Audiofonologia, 2016, 30–38.
- [3] R. Młyński E. Kotarbińska, E. Kozłowski, *Objective tests and the assessment of the acoustic properties of ear-plugs*, Archives of Acoustics, 2006.

- [4] F. Scinicariello, J. Eichwald, Ch. L. Themann, *Safe listening at venues and events with amplified music – united states*, Morbidity and Mortality Weekly Report, 2022.
- [5] U. Jorasz, *Wykłady z psychoakustyki*, Wydawnictwo Naukowe UAM, 1998.
- [6] W. Kazimierczak, *Miernictwo teletechniczne*, Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, 1971.
- [7] E. Kotarbińska, *Indywidualne ochrony słuchu – skuteczność ich działania w środowisku pracy*, Zeszyty naukowe wyższej szkoły zarządzania ochroną pracy w Katowicach, 1(5), 2009, 26–38.
- [8] E. Ozimek, *Dźwięk i jego percepcja* Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018.
- [9] Y. Yang, *Musicalization of the culture: Is music becoming louder, more repetitive, monotonous and simpler?*, Fourteenth International AAAI Conference on Web and Social Media, 14, 2020.

Projekt soczewki akustycznej

Jadwiga Hyla, Jarosław Rubacha

hylajadwiga@student.agh.edu.pl

Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Abstract Soczewki akustyczne to struktury umożliwiające skupienie przenikających przez nie fal akustycznych. Powszechnie znajdują zastosowanie w medycynie, szczególnie w zakresie manipulowania falami ultradźwiękowymi. W artykule przedstawiono problematykę projektowania soczewek dedykowanych dla zakresu częstotliwości słyszalnych, gdzie konieczne jest uwzględnienie większych długości fal akustycznych a tym samym znacznie większych wymiarów struktury. Zaproponowano wykorzystanie periodycznie rozmieszczonych komórek akustycznych, umożliwiających kontrolę współczynnika przenikania dźwięku oraz opóźnienia fazowego fali przenikającej. Przeprowadzono parametryzację pojedynczej komórki akustycznej oraz optymalizację całej struktury soczewki z zastosowaniem algorytmu roju cząstek (PSO). Ostatecznym rezultatem prac jest projekt soczewki o założonych właściwościach akustycznych, umożliwiający skuteczną manipulację falą akustyczną w zakresie częstotliwości słyszalnych.

1. Wprowadzenie

Soczewka akustyczna to ustrój akustyczny służący do zmiany zbieżności wiązki fal akustycznych przenikających przez jej strukturę [7]. Struktura ta to ośrodek sprężysty, ograniczony powierzchniami służącymi do zmiany zbieżności wiązki fal akustycznych rozchodzących się w środowisku, w którym dana soczewka przylega. Soczewki akustyczne ogniskujące falę akustyczną zazwyczaj są wykorzystywane do otrzymywania wiązek ultradźwiękowych o dużej energii. W przypadku zakresu fal słyszalnych soczewki rozpraszające można spotkać jako element kształtujący charakterystykę kierunkowości zestawów głośnikowych np. odbiorników radiowych.

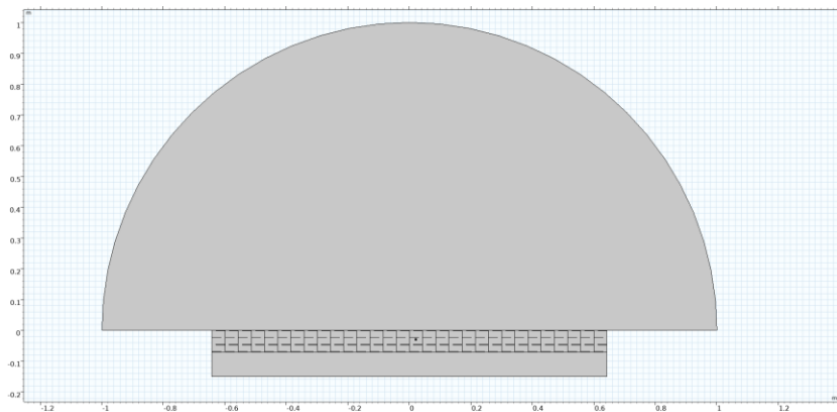
W projekcie dokonano analizy możliwości optymalizacji geometrii skupiającej soczewki akustycznej zbudowanej z wykorzystaniem zwiniętego falowodu opóźniającego fazę przenikającej fali akustycznej. Dokonano analizy wstępnej w celu prawidłowego doboru szerokości pojedynczej komórki, a także wykonano przegląd literaturowy w celu doboru odpowiedniej ilości komórek optymalizowanych.

W procesie obliczeniowym optymalizowanymi parametrami były wymiary studzienek dla każdej z rozpatrywanych komórek. Dla rozpatrywanej metody wykorzystano algorytm optymalizacji metodą roju cząstek (ang. *Particle Swarm Optimization*), który przy umożliwia minimalizację zaimplementowanej funkcji kosztu [3,4]. Analizę oraz optymalizację struktury przeprowadzono dla pojedynczej częstotliwości wynoszącej 1700 Hz, natomiast całą procedurę obliczeniową wykonano z wykorzystaniem modelu numerycznego opracowanego w środowisku COMSOL Multiphysics, natomiast optymalizację przeprowadzono z pomocą języka MATLAB [1].

2. Opis metodyki badań

Optymalizację geometrii analizowanych struktur wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Pełnowymiarowy model, przedstawiony na Rysunku 1, składał się 30 komórek powietrza wraz z dołączonymi kanałami z dodatko-

wymi przeszkodami w postaci przegród wewnętrznych. Przed przystąpieniem do procedury optymalizacji wykonano wstępną optymalizację wymiarów pojedynczej komórki oraz obliczenia dotyczące całkowitego wymiaru ustroju, które pozwoliły określić najbardziej odpowiednie parametry komórek powietrza. Dodatkowo wykonano przegląd literaturowy w celu ustalenia wcześniejszych doniesień dotyczących badanego tematu [2, 5].



Rysunek 1: Geometria modelu numerycznego optymalizowanej struktury soczewki akustycznej

2.1. Optymalizacja struktury soczewki akustycznej

Minimalizowana funkcja kosztu w optymalizacji modelu numerycznego została zdefiniowana jako wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego między znormalizowanymi wartościami $p(\theta)$ odczytanymi dla optymalizowanego modelu, a referencyjnymi, znormalizowanymi wartościami pref wyznaczonymi zgodnie z rozkładem Gaussa:

$$k_{opt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(p_{mod} - p_{ref})^2} \right) \quad (1)$$

gdzie: k_{opt} to wartość funkcji kosztu optymalizacji modelu numerycznego; n to liczba odbiorników na obszarze odczytu, równa 181; p_{mod} to ciśnienie akustyczne odczytane dla kątów θ w odległości 1 m od soczewki z optymalizowanego modelu, [Pa]; p_{ref} to referencyjne ciśnienie akustyczne dla kątów θ , [Pa].

Funkcja referencyjna ciśnienia akustycznego została zdefiniowana jako znormalizowany rozkład Gaussa, gdzie dla $\theta = 0^\circ$ osiąga wartości maksymalne równe 1, a szerokość odchylenia standardowego znajduje się w zakresie $\pm 5^\circ$ od wartości θ .

3. Opis modelu obliczeniowego

W celu zapewnienia pożądanego opóźnienia fazowego oraz minimalizacji tłumienia fali przenikającej zastosowano komórkę z zawiniętym falowodem. Model numeryczny pojedynczej komórki został złożony z dwóch domen powietrza, które umożliwiły propagację fali płaskiej przez strukturę samej komórki oraz odczyt wartości ciśnienia akustycznego, na krawędziach wejścia oraz wyjścia. Model umożliwił analizę współczynnika przenikania dźwięku określonego jako iloraz ciśnienia wylotu oraz wlotu rezonatora. Na podstawie tej relacji wyznaczana była wartość zespolonego współczynnika przenikania dźwięku T [6], a następnie na jego podstawie wyliczono współczynnik przenikania dźwięku τ jako moduł z T oraz opóźnienie fazowe, jako argument zespolonej wartości T , wyrażany w radianach:

$$\varphi = \arg(T) \quad (2)$$

gdzie: φ to opóźnienie fazowe, [rad]; T to zespolony współczynnik przenikania dźwięku, [-].

Optymalizacja geometrii polegała na zmianie długości przegród znajdujących się w komórkach, które wpływały na długość drogi którą miała pokonać propagująca się w falowodzie fala akustyczna. Dla każdej n -tej komórki zdefiniowano parametr skalujący k_n , który odpowiadał za zmianę długości przegród i w efekcie długości zawiniętego falowodu. Wymiary pojedynczego rezonatora wyniosły odpowiednio 70 mm wysokości oraz 40 mm szerokości. Grubość pojedynczej przegrody wewnątrz struktury wyniosła 1 mm. Długość przegród opisano funkcją, zależną od parametru optymalizowanego k_n :

$$c_n = 0,6 \cdot k_n \cdot w_{kom} + 0,1 \cdot w_{kom} \quad (3)$$

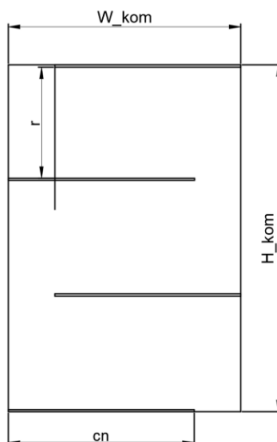
gdzie: c_n to wymiar przegrody wewnętrznej dla n -komórki, [m]; k_n to współczynnik skali optymalizowany dla n -komórki; w_{kom} to szerokość pojedynczej komórki, [m].

Szerokość zawiniętego falowodu r wyniosła $\frac{1}{3}$ wysokości rozważanej komórki. Opisywane zależności przedstawiono na Rysunku 2.

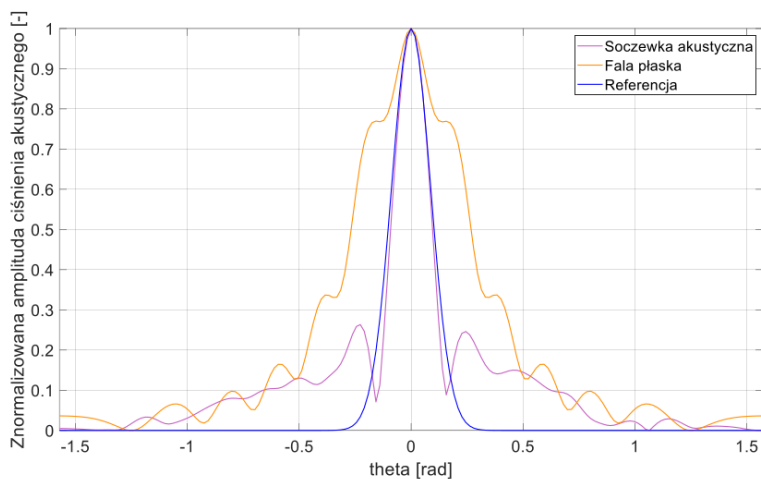
4. Wyniki

Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono na podstawie porównania charakterystyk kierunkowości znormalizowanego ciśnienia akustycznego obliczonego dla pełnowymiarowego, zoptymalizowanego modelu soczewki akustycznej, dla modelu fali płaskiej oraz wartości referencyjnej wyznaczonej zgodnie z rozkładem Gaussa. Przedstawiono również dla każdego wariantu porównanie rozkładów poziomu ciśnienia akustycznego z wynikami dla fali płaskiej. Wykres charakterystyki kierunkowości przedstawiony na Rysunku 3 wskazuje na dopasowanie listka głównego wiązki fali akustycznej do funkcji referencyjnej. Wartości znormalizowanego ciśnienia akustycznego poza oczekiwanej obszarem nie przekraczają wartości 0,3 wartości

maksymalnej. Porównując uzyskane wyniki do modelu fali płaskiej, zaobserwowano duży spadek wartości poza obszarem od -5 do 5° co wskazuje na prawidłową optymalizację struktury soczewki akustycznej.



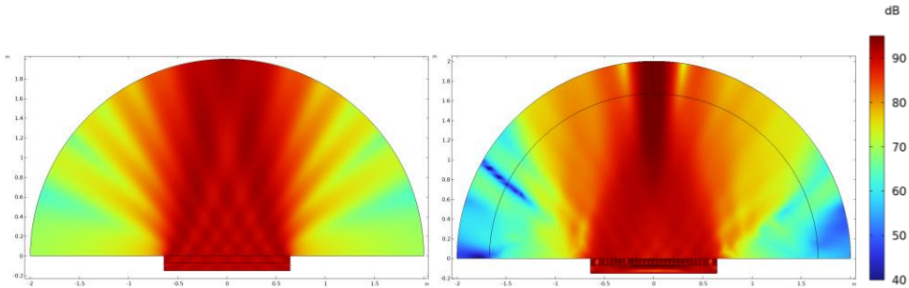
Rysunek 2: Wymiary dla rozpatrywanej pojedynczej komórki geometrii falowodu



Rysunek 3: Porównanie znormalizowanych charakterystyk kierunkowości ciśnienia akustycznego dla fali płaskiej, referencyjnego opóźnienia fazowego oraz zoptymalizowanej soczewki akustycznej

Porównując rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego przedstawione na Rysunku 4a i 4b, wartości dla dużych kątów są znacząco niższe dla zoptymalizowanego modelu soczewki akustycznej. Ponadto uzyskano wysoki poziom ciśnienia akustycznego

(ponad 95 dB) w centralnej części obszaru, dla $\theta = 0^\circ$ w porównaniu do wyników dla fali płaskiej (około 93 dB).



Rysunek 4: Rozkład poziomy ciśnienia akustycznego dla fali płaskiej (po lewej) oraz zoptymalizowanej soczewki akustycznej

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono projekt soczewki akustycznej skupiającej falę akustyczną w zakresie słyszalnym. Przegląd literaturowy oraz wstępna analiza pozwoliły na prawidłowy dobór parametrów pojedynczej komórki oraz ich liczby składającej się na pełnowymiarową skupiającą soczewkę akustyczną. Przyjęta metoda optymalizacji oraz badana geometria badanej struktury umożliwiła spełnienie nadanych założeń. Sparametryzowanie pojedynczej komórki jednym parametrem skalującym jej geometrię k_n pozwoliło na skrócenie czasu obliczeniowego, przy optymalizacji struktury.

Wartości uzyskane dla zoptymalizowanej soczewki akustycznej wskazują na wysokie dopasowanie się modelu do wartości referencyjnej ciśnienia akustycznego, co wskazuje na prawidłowy przebieg procesu optymalizacji i zdefiniowanie funkcji kosztu. Uzyskane wyniki charakteryzowały się lepszym skupieniem wiązki fali akustycznej wokół założonego kąta, niż w przypadku modelu fali płaskiej. Praca pozwoliła na weryfikację możliwości budowy soczewki akustycznej z wykorzystaniem prędkości wewnątrz falowodu, które umożliwiły kształtowanie opóźnienia fazowego, co w efekcie pozwoliło na uzyskanie założonej kierunkowości.

Bibliografia

- [1] I. Czajka, A. Gołaś, *Inżynierskie metody analizy numerycznej i planowanie eksperymentu*, Kraków, Wydawnictwo AGH, 2017.
- [2] K. Dusza, *Projekt panelu refleksyjnego do kształtowania pierwszych odbić dźwięku zbudowanego w oparciu o metamateriały akustyczne*, Praca dyplomowa magisterska, AGH University of Krakow, 2022.

- [3] P. Foryś, *Zastosowanie metody roju cząstek w optymalnym projektowaniu elementów konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008.
- [4] M. Heris, *Particle Swarm Optimization in MATLAB*, Yarpiz, 2015. <https://yarpiz.com/50/ypea102-particle-swarm-optimization> (dostęp Jan. 14, 2025).
- [5] J. Hyla, *Analiza możliwości budowy soczewki akustycznej z wykorzystaniem metamateriałów akustycznych*, Praca dyplomowa inżynierska, AGH University of Krakow, 2025.
- [6] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sanders, *Fundamentals of Acoustics 4th edition*, John Wiley & Sons, January 2000.
- [7] Ch. Pan, M. Kehn, Quevedo, O. Teryel, *Microwave Focusing Lenses by Synthesized with Positive or Negative Refractive Index Split-Ring Resonator Metamaterials*, International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), 2015, doi: 10.1109/iWEM.2015.7365057.

Badanie możliwości łączenia pojedynczych metamateriałów membranowych w wielokomórkowe ustroje do zwiększania izolacyjności akustycznej

Sara Kopeć, Klara Chojnacka

sarakopec@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

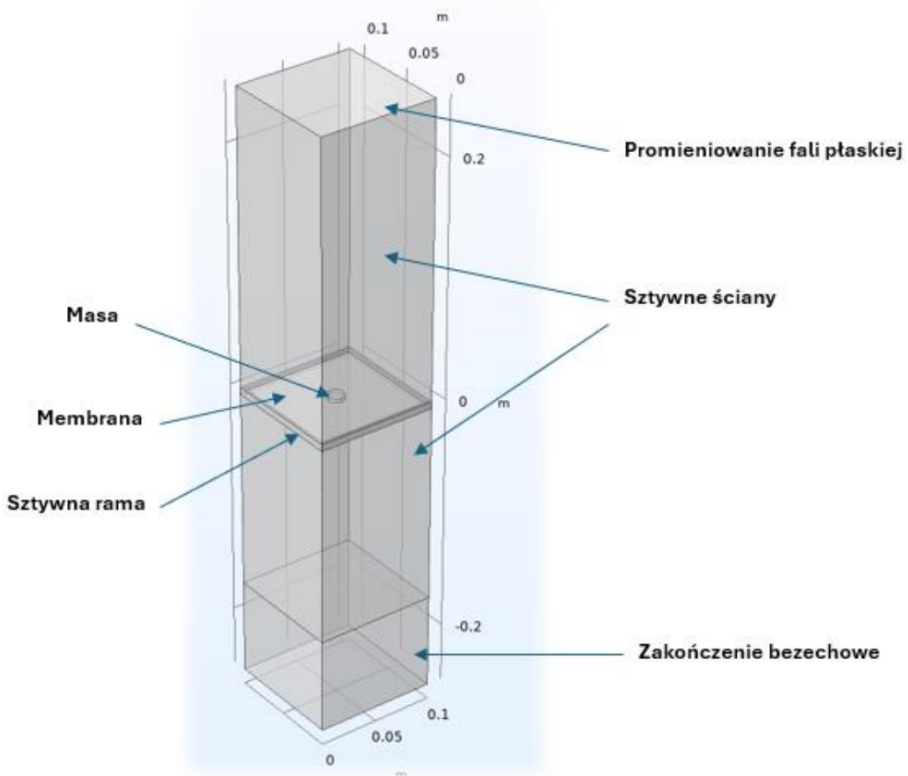
Abstract Membranowe struktury rezonansowe, czyli metamateriały membranowe, to nowoczesne rozwiązanie w izolacji akustycznej, szczególnie dla niskich częstotliwości. W przeciwieństwie do tradycyjnych materiałów, pozwalają na skuteczne tłumienie dźwięku bez znacznego zwiększania masy. W pracy opracowano i zweryfikowano model numeryczny opisujący ich zachowanie oraz metody modyfikacji charakterystyki tłumienia. Szczególną uwagę poświęcono układom wielokomórkowym, poszerzającym zakres tłumienia. Założenia teoretyczne zweryfikowano eksperymentalnie w rurze impedancyjnej zgodnie z normą ASTM E2611-09, porównując wyniki z modelem numerycznym.

1. Wprowadzenie

Kontrola hałasu, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii. Hałas niskoczęstotliwościowy charakteryzuje się dużą długością fali, co skutkuje trudnościami w jego efektywnym tłumieniu przy zachowaniu akceptowalnej grubości osłony. Zgodnie z prawem masy, izolacyjność akustyczna klasycznych materiałów dźwiękoizolacyjnych jest wprost proporcjonalna do ich masy oraz grubości, co jest sprzeczne z trendami projektowymi dążącymi do redukcji ciężaru i objętości. W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie budzą metamateriały akustyczne [2], a w zakresie izolacyjności, szczególnie metamateriały membranowe (ang. *membrane-type acoustic metamaterial*, MAM). Są to systemy składające się z napiętej elastycznej membrany na sztywnej ramie z dodatkowymi elementami, które mają na celu stroić częstotliwość rezonansową ustroju [3,4]. Taka konstrukcja prowadzi do wystąpienia lokalnych rezonansów, które z kolei powodują powstawanie pasma częstotliwości dla którego nie występuje propagacja fal dźwiękowych [5]. Dzięki temu MAM wykazują doskonałe właściwości w zakresie izolacji dźwięków o niskich częstotliwościach [6]. Współczesne badania nad metamateriałami membranowymi wykazują ich duży potencjał w zakresie poprawy izolacyjności akustycznej. Naify i in. [7] zaprojektowali strukturę składającą się z masy przytwierdzonej sztywno do okrągłej membrany wykonanej z polieteroimidu, która została napięta na sztywnej ramie podporowej z żywicy epoksydowej. Wyniki eksperymentalne oraz symulacyjne jednoznacznie potwierdziły skuteczność tego rodzaju struktur w tłumieniu dźwięku w zakresie niskich częstotliwości. Z kolei Peng i in. [8] opracowali model numeryczny metamateriałów membranowych oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazały wysoką zgodność z wynikami eksperymentalnymi, potwierdzając skuteczność modelowania tego typu struktur w kontekście poprawy izolacyjności akustycznej. Celem niniejszej pracy było zbadanie właściwości akustycznych metamateriałowych ustrojów membranowych oraz poszerzenie zakresu częstotliwości ich działania w tłumieniu dźwięku poprzez zastosowanie struktur wielokomórkowych.

2. Model numeryczny komórki elementarnej membranowego ustroju rezonansowego

W niniejszej pracy zastosowano analizę efektywności struktur membranowych w oparciu o metodę elementów skończonych MES przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics. W tym celu opracowany został model komórki elementarnej MAM (Rysunek 1).



Rysunek 1: Wykonany model z wykorzystaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics

Części stałe obejmowały membranę o określonej grubości, długości boku oraz naprężeniu, masę o zadanym promieniu i wysokości, a także ramę o określonych wymiarach geometrycznych. Dla powierzchni transmitowanej zostały określone warunki brzegowe promieniowania fali płaskiej, przy czym ciśnienie padającej fali ustalono na 1 Pa. Natomiast po stronie odbiorczej uwzględniono zakończenie bezdechowe.

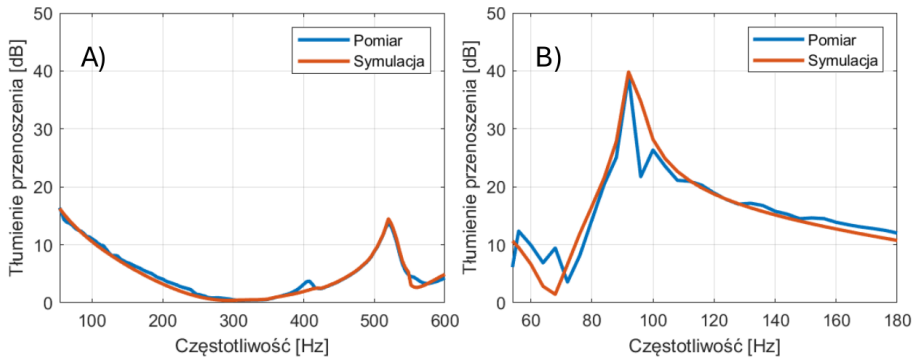
2.1. Walidacja modelu numerycznego

W kolejnym etapie przeprowadzono walidację modelu obliczeniowego poprzez pomiary w rurze impedancyjnej B&K 4206T o średnicy 100 mm zgodnie z normą ASTM E2611-09 [9], wykorzystując czteromikrofonową metodę funkcji przejścia. Pomiary umożliwiły wyznaczenie tłumienia przenoszenia (ang. *Transmission Loss*, TL), zdefiniowanego jako logarytmiczny stosunek mocy akustycznej fali padającej na próbkę do mocy fali transmitowanej przez próbkę [10]. W celu umożliwienia pomiaru próbek o kształcie kwadratu zaprojektowano i wydrukowano specjalną konstrukcję mocującą. Eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem membrany wykonanej z folii PCV o grubości 0,1 mm i wymiarach 60 x 60 mm. Do membrany przymocowano masę o średnicy 11,6 mm i wysokości 5,4 mm. Wprowadzono również modyfikacje konstrukcyjne, zmieniając kształt ramki z kwadratowego na okrągły, co umożliwiło pomiary w rurze impedancyjnej oraz zapewniło zgodność modelu z rzeczywistymi warunkami eksperymentalnymi (Rysunek 2). Zbadano tłumienie dla pustej membrany oraz po dodaniu jednej masy.



Rysunek 2: Zdjęcia prototypów ustrojów membranowych

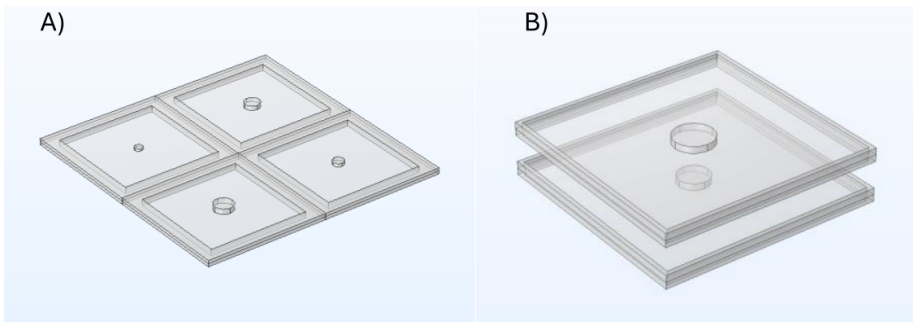
Następnie dokonano dopasowania modelu do uzyskanych wyników eksperymentalnych, uwzględniając niepewność parametrów materiałowych. Ze względu na brak dokładnych danych dotyczących właściwości zastosowanych materiałów, model był modyfikowany pod kątem parametrów takich jak naprężenie membrany oraz jej moduł Younga. Rysunek 3 przedstawia charakterystykę tłumienia przenoszenia dla samej membrany w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 600 Hz oraz wyniki dla membrany z jedną masą dla zakresu częstotliwości od 50 do 180 Hz. Obserwuje się dobrą zgodność modelu z pomiarami, zarówno częstotliwości rezonansowej jak i wartości tłumienia przenoszenia.



Rysunek 3: Zdjęcia prototypów ustrojów membranowych

3. Możliwość łączenia pojedynczych metamateriałów membranowych w ustrój wielokomórkowy

celu zwiększenia efektywności tłumienia dźwięku przeprowadzono analizę możliwości łączenia pojedynczych membran w układy wielokomórkowe. Rozważano dwa sposoby konfiguracji: łączenie poziome oraz łączenie pionowe (Rysunek 4). W obu przypadkach każda z membran została indywidualnie dostrojona do innej częstotliwości rezonansowej poprzez odpowiednią zmianę wysokości i promienia masy.

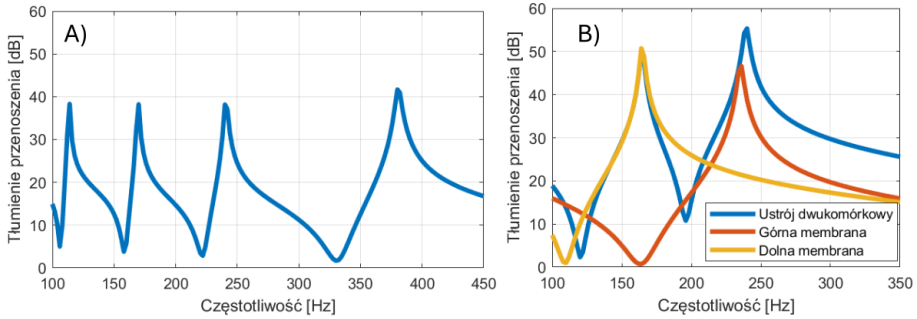


Rysunek 4: Łączenie membran w układzie poziomym A) oraz pionowym B)

Na Rysunku 5 przedstawiono wyniki symulacji dla układu wielokomórkowego z poziomym i pionowym łączeniem membran. Dla układu poziomego są cztery wyraźne lokalne maksima, odpowiadające częstotliwościom rezonansowym poszczególnych membran. Konfiguracja ta pozwala na uzyskanie struktury o rozszerzonym zakresie efektywnego tłumienia dźwięku dla wybranych częstotliwości.

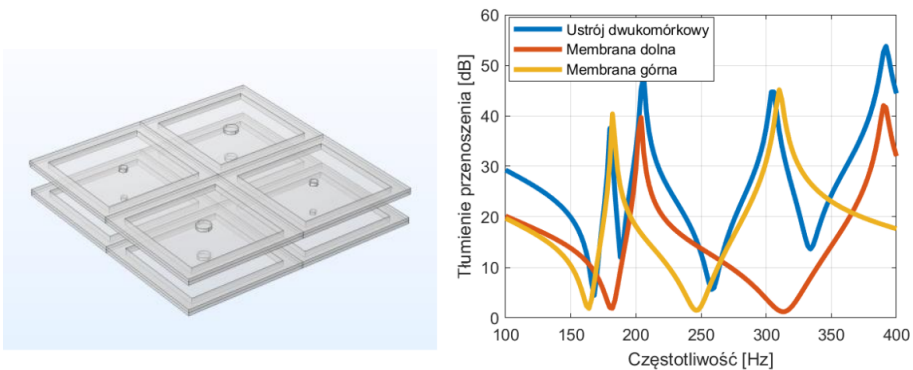
Dla układu z pionowym łączeniem membran, zaobserwowano dwa lokalne maksima związane z częstotliwościami rezonansowymi poszczególnych membran. Ta konfiguracja zapewnia poszerzenie zakresu skutecznego tłumienia dźwięku, jednocześnie

minimalizując wzajemne oddziaływania między membranami. Kluczowym aspektem w tym układzie jest odpowiednia odległość między komórkami, która pozwala uniknąć zakłóceń w pracy membrany znajdującej się w warstwie górnej.



Rysunek 5: Wyniki symulacji dla ustroju wielokomórkowego – połączenie poziome A) i pionowe B)

Aby zwiększyć zakres tłumienia, zastosowano połączenie obu metod, łącząc membrany zarówno w pionie, jak i w poziomie. W rezultacie opracowano strukturę składającą się z dwóch warstw, z których każda została dostrojona do dwóch różnych częstotliwości rezonansowych. Wyniki symulacji dla tego układu, przedstawione na Rysunku 6, wykazują znaczne poszerzenie zakresu tłumienia w porównaniu do pojedynczej membrany. Jednocześnie należy pamiętać, że wraz ze wzrostem liczby rezonansów pojawiają się lokalne minima tłumienia, które mogą wymagać dalszych modyfikacji konstrukcyjnych w celu uzyskania bardziej wyrównanej charakterystyki akustycznej.



Rysunek 6: Łączenie membran w układzie poziomo-pionowym

4. Podsumowanie

W pracy przeprowadzono badania dotyczące zastosowania metamateriałowych membranowych ustrojów rezonansowych w celu poprawy izolacyjności akustycznej, ze szczególnym uwzględnieniem tłumienia w zakresie niskich częstotliwości. W ramach pracy opracowano model numeryczny metamateriałowego układu membranowego, który następnie został poddany walidacji na podstawie pomiarów przeprowadzonych zgodnie z normą ASTM E2611-09. Dodatkowo przeanalizowano możliwość łączenia pojedynczych membran w układ wielokomórkowy, zarówno w konfiguracji poziomej, pionowej jak i mieszanej (poziomo-pionowej). Analiza przeprowadzonych badań potwierdziła, że zastosowanie membranowych metamateriałów akustycznych umożliwi efektywną izolację dźwięków w zakresie niskich częstotliwości, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej masy i kompaktowych wymiarów struktury.

Bibliografia

- [1] *Acoustic and Thermal Insulating Materials*, Building Decorative Materials, 2011, 359–374.
- [2] W.Q. Wu, Y. Bin Zhang, L. Xu, L. X. Zhao, T.G. Chen, *Design and evaluation of an acoustic metamaterial for ducted an noise control*, Applied Acoustics, 2025, 233, 110612.
- [3] S. Li, D. Mao, S. Huang, X. Wang, *Enhanced transmission loss in acoustic materials with micro-membranes*, Applied Acoustics, 2018, 130, 92–98.
- [4] Z.A. Yang, Y.J. Chen, X.Y. Hu, R.H. Bao, *Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass*, Phys Rev Lett, 2008, 20, 101.
- [5] Y. Zhang, J. Wen, Y. Xiao, X. Wen, J. Wang, *Theoretical investigation of the sound attenuation of membrane-type acoustic metamaterials*, Phys Lett A, 2012, 376, 17, 1489–1494.
- [6] G. Ma, P. Sheng, *Acoustic metamaterials: from local resonances to broad horizons*, Sci Adv, 2016, 2, 2.
- [7] C.J. Naify, C.M. Chang, G. McKnight, S. Nutt, *Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally resonant acoustic metamaterials*, J Appl Phys, 2010, 108, 11.
- [8] W. Peng, J. Zhang, M. Shi, J. Li, S. Guo, *Low-frequency sound insulation optimisation design of membrane-type acoustic metamaterials based on Kriging surrogate model*, Mater Des, 2023, 225.
- [9] ASTM E2611-09: Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method.
- [10] D. Caballol, A.P. Raposo, *Analysis of the measurement of transmission loss in rigid building materials with a standing wave tube*, Constr Build Mater, 2018, 182, 242–248.

Wpływ maskowania sygnałów dźwiękowych na zapamiętywanie wysokości dźwięku

Dominika Kuczak, Maurycy Kin

dominika.kuczak@outlook.com

Politechnika Wroclawska

Abstract Percepcja wysokości dźwięku stanowi proces, którego mechanizmy nie zostały dotychczas w pełni wyjaśnione. Dotychczas dominują dwie główne teorie: teoria czasu oraz teoria miejsca. Innym istotnym mechanizmem obserwowanym u człowieka jest zjawisko maskowania. Przeprowadzono zatem badanie obu tych procesów polegające na analizie wpływu maskowania na zapamiętywanie tonów prostych. Eksperyment polegał na zapamiętywaniu generowanych tonów o trzech różnych częstotliwościach. Były one maskowane trzema typami sygnałów szumowych. Badanie przeprowadzono przy użyciu słuchawek, gdzie na oba kanały podano ten sam sygnał. Wyniki badania wskazują, że wraz ze wzrostem częstotliwości generowanych tonów obniża się dokładność ich dostrajania. Analiza wykazała również, że szum różowy i szum biały w większym stopniu wpływają na proces zapamiętywania wysokości tonów niż szum kafeterii. Jednakże przeprowadzona analiza statystyczna sugeruje, że wpływ maskowania nie jest znacząco istotny.

1. Wstęp

Każdy dźwięk, który jesteśmy w stanie usłyszeć, składa się z tonów, które charakteryzują się pewną częstotliwością. W rzeczywistości istnieją głównie dźwięki, które nazywane są wielotonami, czyli dźwiękami składającymi się z wielu częstotliwości. Wysokość dźwięku jest więc istotna, szczególnie przy percepcji muzyki. W literaturze przedmiotu wyróżnia się dwie teorie percepcji wysokości: teorię miejsca, która jest związana z maksymalnym wychyleniem błony podstawnej w odpowiednim miejscu, oraz teorię czasową – mówiącą o związku między impulsami neuronowymi a wartością odwrotności okresu między poszczególnymi wyładowaniami [1,2]. Ze względu na fakt, iż obie z wymienionych teorii nie wyjaśniają w pełni procesu percepcji wysokości, powszechnie wykorzystuje się teorię eklektyczną, która stanowi połączenie i wykorzystanie elementów z obu tych modeli.

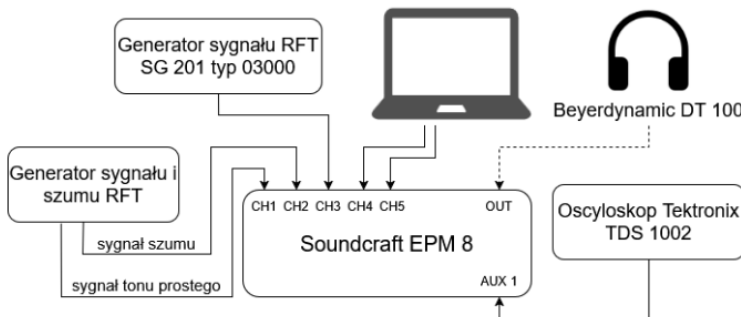
Innym zjawiskiem występującym u człowieka, dotyczącym dźwięków, jest maskowanie. Efekt ten powstaje w układzie słuchowym i polega na podwyższeniu progu słyszenia danego dźwięku, spowodowanego obecnością innego dźwięku. Może być ono równoczesne, gdzie oba sygnały występują jednocześnie. Można również zaobserwować to zjawisko przy maskowaniu wstecznym, gdy sygnał maskera występuje po sygnale bądź resztkowym – masker występuje przed sygnałem [1,2].

W niniejszej pracy podjęto się analizy wpływu maskowania dźwięków na zapamiętywanie wysokości dźwięków. W tym celu przeprowadzono badanie wykorzystując efekt maskowania przez trzy typy sygnałów szumowych: szum biały, szum różowy oraz szum kafeterii. Zapamiętywanymi częstotliwościami w badaniu były 1000, 2450 oraz 6000 Hz.

2. Metodyka badań

Eksperyment polegał na zapamiętywaniu, przez badane osoby, wysokości tonów podstawowych, które były maskowane różnymi szumami. Do badań wykorzystano trzy wartości częstotliwości tonów: 1000 Hz, 2500 Hz oraz 6000 Hz oraz następujące sygnały maskujące: szum biały, szum różowy oraz szum kafeterii (ang. *cafeteria noise*). W badaniu wzięło udział 10 studentów, wyłącznie praworęcznych (ze względu na jednolity, potwierdzony w literaturze wpływ sposobu pisania na zapamiętywanie wysokości [5]), o różnym osłuchaniu muzycznym. Testy przeprowadzono w sali odsłuchowej Katedry Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów Politechniki Wrocławskiej.

Na Rysunku 1 przedstawiono schemat układu pomiarowego, który składał się z dwóch generatorów: wzorcowego oraz umożliwiającego dostrajanie, oscyloskopu służącego głównie do pomiaru częstotliwości (z rozdzielczością do 0,001 Hz), stołu mikserskiego służącego do komutacji sygnałów, źródła sygnałów zakłócających w postaci generatora szumów lub laptopa (szum kafeterii) oraz słuchawek.



Rysunek 1: Schemat blokowy układu pomiarowego

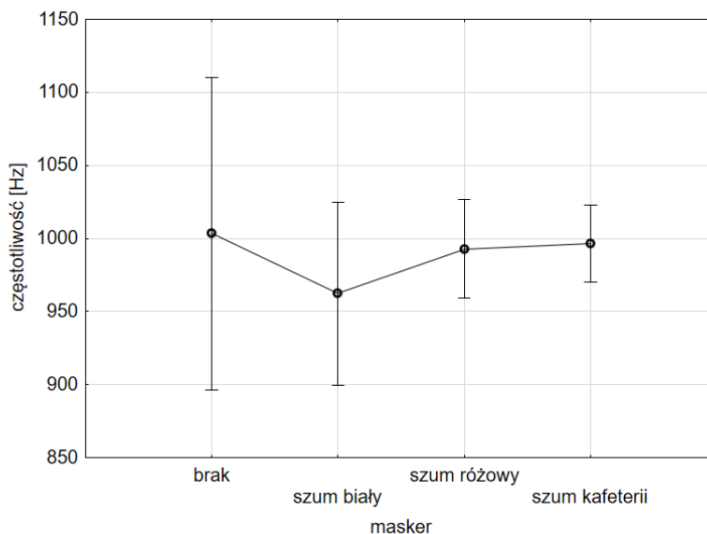
3. Wyniki i analiza badań

Do obróbki wyników badania wykorzystano oprogramowanie Microsoft Excel, natomiast analizy statystycznej wyników dokonano z wykorzystaniem programu Statistica 14.1.0.4.

Do analizy wyznaczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe wyników dostrajania. Wyniki przedstawiono w formie wykresów, gdzie przedstawiono wartość średnią oraz odchylenie standardowe wyników w zależności od rodzaju maskera dla zapamiętywanych wysokości (Rys. 2 – 4).

Wartość średnia otrzymana dla częstotliwości 1000 Hz jest bardzo zbliżona do częstotliwości wzorcowej - we wszystkich przypadkach wykorzystywanego maskera średnia wartość różnicy częstotliwości nie przekracza 40 Hz. Należy jednak zauwa-

żyć, że dostrajanie w warunkach bez maskera charakteryzuje się największą wartością odchylenia standardowego, co świadczy o znacznym rozproszeniu wyników. Zastosowanie maskera prowadzi do zmniejszenia wartości odchylenia standardowego, co oznacza zwiększenie dokładności dostrajania.



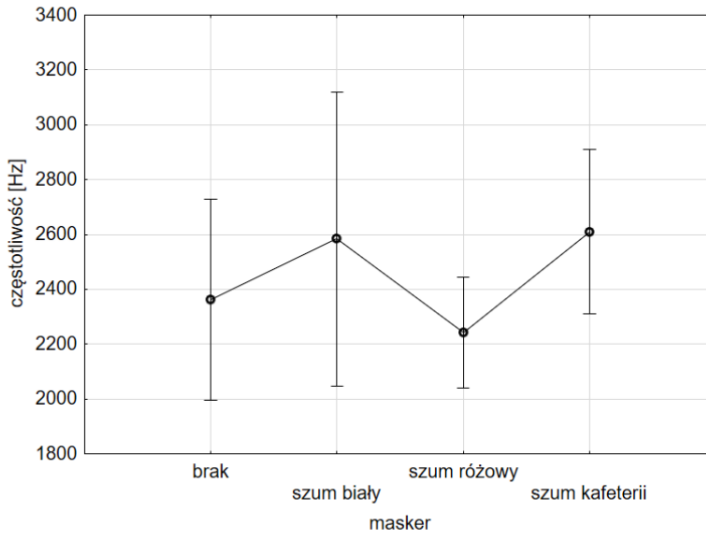
Rysunek 2: Wartość średnia dobieranych wartości częstotliwości przez badanych w zależności od rodzaju maskera – częstotliwości 1000 Hz

W przypadku częstotliwości z 2 450 Hz wartość odchylenia standardowego jest największa w przypadku szumu białego jako sygnału maskującego. Dla prezentacji bez maskera odchylenie standardowe jest mniejsze, natomiast dokładność dostrajania jest najwyższa w przypadku szumu różowego. Co ciekawe – w tym przypadku wartość średnia dostrojonych różni się od wzorca o ok. 250 Hz.

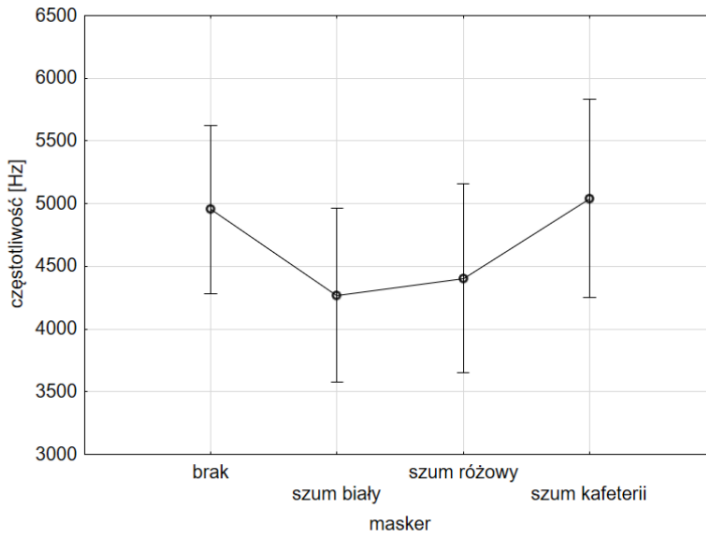
Dla najwyższej częstotliwości wzorcowej otrzymany rozrzut wyników wokół średniej jest prawie jednakowy, pomimo dużej wartości różnicy pomiędzy częstotliwością wzorcową a dostrajaną - wartości odchylen przekraczają niekiedy 1500 Hz. Zaobserwowano także tendencję do zaniżania wrażenia wysokości we wszystkich przypadkach maskowania.

4. Dyskusja wyników

Jak można zauważyć, dla częstotliwości wzorcowej 1000 Hz otrzymano największy rozrzut wartości częstotliwości dostrajanej, a przy dowolnym maskerze - wartości bardziej skupione. W przypadku wyższych częstotliwości można zauważyć tendencję odwrotną: brak maskera powodował mniejszy błąd dostrajania oraz mniejsze różnice średniej wartości częstotliwości tonu dostrajanego w stosunku do częstotliwości wzorca.



Rysunek 3: Wartość średnia dobieranych wartości częstotliwości przez badanych w zależności od rodzaju maskera – częstotliwości 2450 Hz

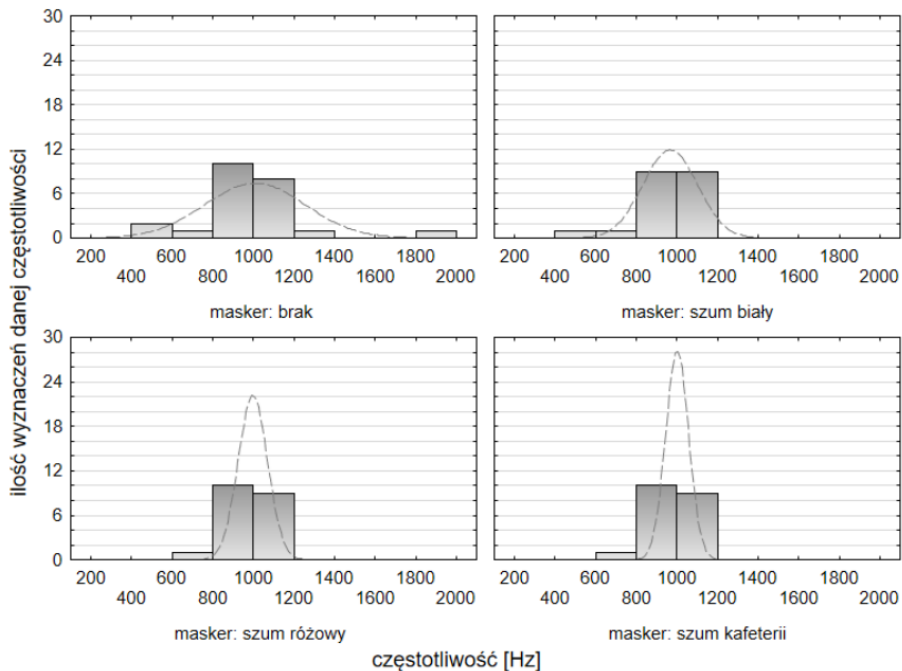


Rysunek 4: Wartość średnia dobieranych wartości częstotliwości przez badanych w zależności od rodzaju maskera – częstotliwości 6000 Hz

W przypadku szumu białego zaobserwowano ponadto tendencję do zawyżania

wrażenia wysokości (dla częstotliwości 2450 Hz) bądź jej obniżania (dla częstotliwości 6000 Hz). Pozostałe rodzaje szumu ewokowały bardziej jednoznaczne wyniki – szum różowy powodował zaniżanie wrażenia wysokości, natomiast szum kafeterii – jej podwyższenie.

W celu weryfikacji istotności statystycznej otrzymanych wyników przeprowadzono również dwa testy statystyczne: test Levene'a do oceny homogeniczności wariancji poszczególnych wyników oraz analizę wariancji ANOVA, w celu określenia, czy wartości średnie poszczególnych zbiorów (analiza poszczególnych wartości częstotliwości tonów prostych) są ze sobą zbieżne [6,7]. Poziom istotności obu testów ustalono na $\alpha=0,05$. W wyniku testu Levene'a otrzymano wartości prawdopodobieństw przekraczających wartość poziomu istotności ($p = 0,055$; $0,285$ oraz $0,634$ dla częstotliwości odpowiednio: 1000, 2450 oraz 6000 Hz). Oznacza to, iż wynik jest nieistotny statystycznie. Nie można tym samym odrzucić hipotezy zerowej, mówiącej, iż wariancje są homogeniczne we wszystkich zestawach pomiarowych, co dało możliwość przeprowadzenia testu jednoczynnikowej analizy wariancji.

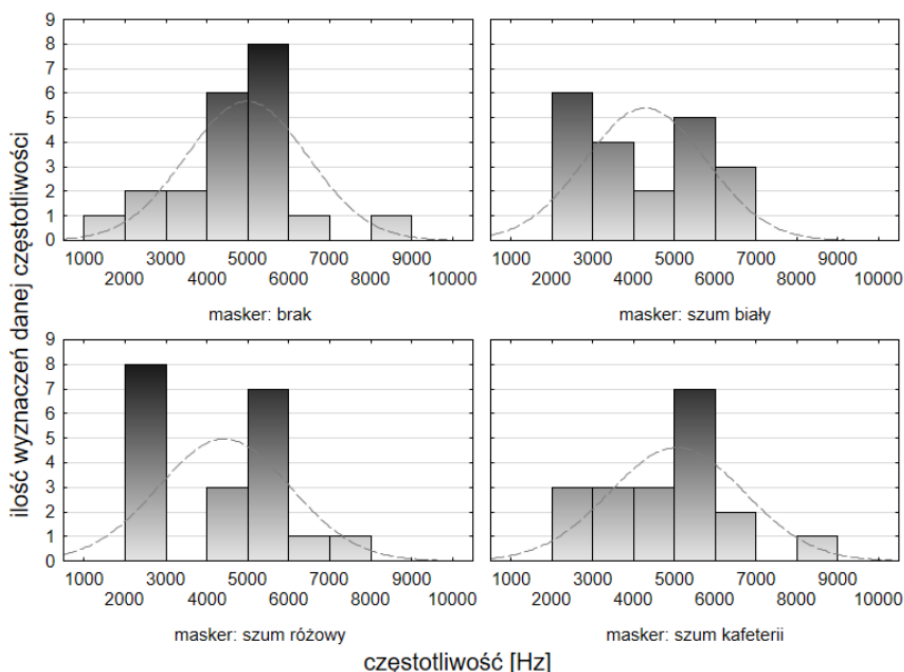


Rysunek 5: Histogramy przedstawiające rozkład dobieranych wartości częstotliwości w zależności od rodzaju maskera – częstotliwość 1000 Hz

W wyniku testu jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA uzyskano wartości prawdopodobieństwa równe $p = 0,83$; $0,41$ oraz $0,30$ odpowiednio dla częstotliwości wzorcowych 1000, 2450 oraz 6000 Hz. Wartości te wskazują, że wyniki są nieistotne

statystycznie, co oznacza, że nie wykazano statystycznie istotnych różnic między wartościami średnich dostrojzeń. Powyższy fakt oznacza, że nie istnieją istotne różnice pomiędzy poszczególnymi grupami (rodzajami szumu).

Na zamieszczonych histogramach (Rys. 5–6) widoczna jest także tendencja do popełniania błędów oktaowych, które polegały na dostrajaniu się do częstotliwości o oktawę niżej niż wartość wzorcowa, co może tłumaczyć obniżenie średniej wartości częstotliwości dostrojzeń.



Rysunek 6: Histogramy przedstawiające rozkład dobieranych wartości częstotliwości w zależności od rodzaju maskera – częstotliwość 6000 Hz

Ponieważ wartości średnie nie pozwalają na sformułowanie jednoznacznych wniosków dotyczących mechanizmu percepcji wysokości tonów w zależności od charakteru maskowania postanowiono wprowadzić do analizy wyników jeszcze jeden parametr: Siłę Wrażenia Wysokości (SWW). Jest to miara spotykana w psychoakustyce w badaniach nt. rozdzielczości narządu słuchu w dziedzinie częstotliwości tak dla dźwięków prostych, jak i złożonych [8,9,10]. SWW jest odwrotnością odchylenia standardowego wyników, co pozwala określić niepewność w określeniu wrażenia wysokości oraz precyzję procesu dostrajania. Wyniki zestawiono w Tabeli 1.

Jak można zauważyć, średnie wartości SWW są dosyć niskie, ale może to wynikać z udziału w badaniu osób bez wstępnej preselekcji dotyczącej percepcji wysokości dźwięku. Jak wskazują źródła literaturowe [10] wykwalifikowana ekipa odsłuchowa

może osiągnąć wartości SWW na poziomie wyższym niż 0,5000. Z uzyskanych wyników można jednak wywnioskować, iż zmienność SWW zależy od częstotliwości wzorca, natomiast dla poszczególnych tonów, bazując na wynikach analizy wariancji, różnice te wydają się być nieistotne statystycznie, choćby ze względu na niezbyt dużą liczbę dostrojów oraz niewielką ich precyzję wynikającą z małego doświadczenia słuchaczy.

	1000 Hz	2450 Hz	6000 Hz
brak	0,004	0,0012	0,00068
szum biały	0,007	0,0009	0,00068
szum różowy	0,014	0,0023	0,00060
szum kafeterii	0,018	0,0016	0,00060

Tabela 1: Tabela zestawiająca parametr SSW dla poszczególnych częstotliwości wzorcowych oraz rodzaju maskera

5. Podsumowanie

W pracy opisano eksperyment mający na celu przeprowadzenie analizy wpływu maskowania na zapamiętywanie tonów prostych. W tym celu przeprowadzono badanie polegające na zapamiętywaniu generowaniu trzech różnych częstotliwości oraz trzech typów sygnałów maskowania. Eksperyment przeprowadzono w sposób monauralny na słuchawkach.

Przeprowadzone badanie daje bardzo zróżnicowane wyniki. Można z nich wywnioskować, iż najłatwiej zapamiętywaną częstotliwością jest 1000 Hz. Jest to częstotliwość, którą najczęściej wykorzystuje się do pewnych odniesień – przykładowo dla izofon [1,2], czy też jako sygnał odniesienia w pomiarach akustycznych. Zróżnicowanie w wynikach dla tej częstotliwości wynikać może z braku wystarczającego treningu słuchowego u pojedynczych słuchaczy. Najmniejszy efekt maskowania uzyskano dla szumu kafeterii, charakteryzującego się największą zmiennością. Nie można też pominąć faktu, iż ten rodzaj maskera był oceniany w ostatniej części badania, więc słuchacze mogli się już przyzwyczaić do odsłuchiwanej częstotliwości.

Największe trudności w zapamiętaniu wysokości słuchacze wykazywali dla tonu o częstotliwości 6000 Hz. Potwierdzają to także wyniki badań mówiące o tym, że człowiek jest w stanie dokładnie odwzorować częstotliwości do 5000 Hz [3,4]. Warto podkreślić, że dostrajanie do częstotliwości 6000 Hz okazało się równie trudne zarówno w obecności sygnału maskującego, jak i bez niego.

Wyniki eksperymentu pokazały, że szum biały i szum różowy były najbardziej skutecznymi metodami maskowania. Pod ich wpływem zapamiętywano wysokość odpowiadającą częstotliwości wyższej bądź niższej niż częstotliwość tonu wzorcowego, przy czym w przypadku szumu różowego słuchacze wykazywali tendencję do wykonywania błędów oktaowych. Wykorzystując szum kafeterii jako masker,

otrzymywano dużą dokładność dostrajania wysokości dźwięku, co oznacza, iż nie jest on skutecznym sposobem maskowania.

W przyszłości autorzy zamierzają kontynuować te badania z udziałem większej liczby słuchaczy oraz dokonać wstępnej selekcji słuchaczy na grupy o większych i małych zdolnościach do określania wysokości tonów. Pozwoli to na skategoryzowanie zdolności do zapamiętywania wysokości dźwięków w obecności różnych sygnałów zakłócających. Można spodziewać się także, że rezultaty badań z udziałem większej liczby słuchaczy dadzą przyczynek do uzupełnienia wiedzy na temat zdolności układu słuchowego do analizowania informacji w różnych warunkach percepcji dźwięku.

Bibliografia

- [1] U. Jorasz, *Wykłady z psychoakustyki.*, Wydawnictwo naukowe UAM, 1998.
- [2] B. Moore, *Wprowadzenie do psychologii słyszenia.*, PWN, 1999.
- [3] A. Oxenham, *Pitch Perception.*, The Journal of Neuroscience, 2012.
- [4] B. Moore, *Frequency difference limens for short-duration tones.*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 54-3, 1973.
- [5] D. Deutsch, *Pitch Memory: An Advantage for the Left-handed.*, Science, Vol. 199, No. 4328, pp. 559-560, 1978.
- [6] J. Kornacki, J. Mielniczuk, *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych.*, WNT, 2018.
- [7] J. Gastwirth, Y. Gel, W. Miao, *The Impact of Levene's Test of Equality of Variances on Statistical Theory and Practice.*, Statistical Science, 2010.
- [8] A. Rakowski, *Tuning of isolated musical intervals.*, Journal of the Acoustical Society of America, 59, Supp. 1, Spring, 50, 1976.
- [9] H. Fastl, E. Zwicker, *Pitch and Pitch Strength.*, w: Psychoacoustics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [10] M. Fruhmann, *On the pitch strength of harmonic complex tones and comb-filter noises.*, Proc. of CFA/DAGA'04, Strasbourg, pp. 757-758, 2004.

Projektowanie i analiza dźwiękoizolacyjnych metamateriałów akustycznych typu soft solid z wtrąceniami periodycznymi

Agata Maciuszek, Klara Chojnacka

amaciuszek@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Abstract Metamateriały wibroakustyczne mogą przyjmować różne formy i mieć różnorodne zastosowania, takie jak zwiększenie izolacyjności akustycznej w zakresach, w których przy użyciu tradycyjnych materiałów jednorodnych nie jest możliwe uzyskanie wystarczającej skuteczności. W celu osiągnięcia tego efektu, aby wpłynąć na fale rozchodzące się w elemencie podstawowym, rozmieszczane są w regularnych odstępach na dostępnej przestrzeni elementy rezonansowe. W pracy skupiono się na analizie metamateriału wibroakustycznego typu soft solid z periodycznymi wtrąceniami – strukturze złożonej z materiału porowatego oraz cyklicznych aluminiowych elementów. W ramach prac wykonany został model w programie COMSOL, który uwzględnił interakcję domeny akustycznej z ciałem stałym. Analizie poddano wpływ zmian parametrów materiałowych oraz geometrycznych na efektywność struktury. Bazując na wynikach symulacji wykonano prototyp struktury objętej opracowaniem, dla którego następnie przeprowadzono pomiary izolacyjności akustycznej w polu rozproszonym.

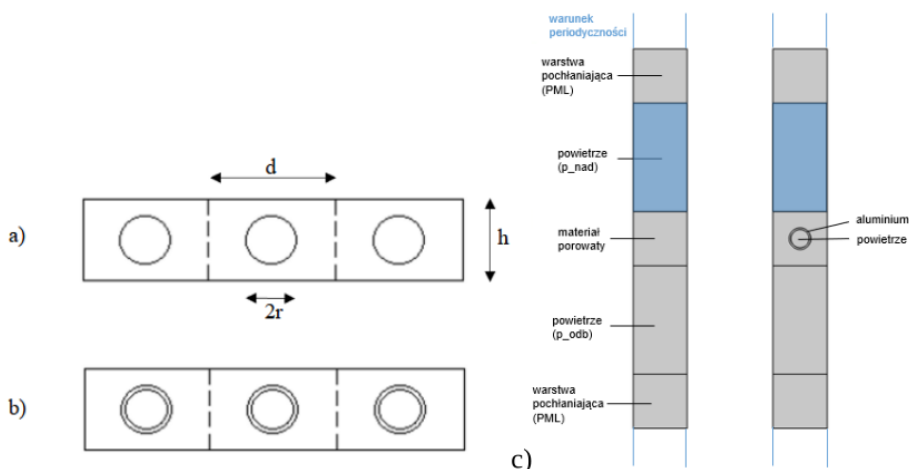
1. Wstęp

Jako że hałas w przemyśle z roku na rok staje się coraz większym problemem, wciąż opracowywane zostają różnorodne metody jego redukcji. Jednak uzyskanie zadowalających wyników w paśmie niskich częstotliwości jest często nieosiągalne poprzez zastosowanie materiałów tradycyjnych, dlatego coraz dynamiczniej rozwijane jest zagadnienie metamateriałów. Metamateriały to struktury, które dzięki swojej konstrukcji mogą posiadać właściwości niemożliwe do osiągnięcia przez materiały tradycyjne, takie jak zwiększenie izolacyjności szczególnie w paśmie niskich częstotliwości, jednocześnie zachowując niewielkie rozmiary oraz wagę [1]. Ich cechą charakterystyczną jest zależność skuteczności nie tylko od parametrów materiałowych, ale w dużej mierze od ich geometrii. Zagadnienie metamateriałów jest stosunkowo nowe, wciąż prowadzone są na ich temat badania. W tej pracy poddany analizie zostanie metamateriał oparty na strukturze soft solid wraz z periodycznymi wtrąceniami, zaprojektowany w celu zwiększenia izolacyjności w paśmie niskich częstotliwości [2,3]. Analizę wykonano za pomocą symulacji numerycznych oraz pomiarów. Symulacje przeprowadzono na podstawie modelu struktury wykonanego w programie COMSOL. Porównano wpływ zmian geometrii struktury na jej właściwości akustyczne, a na podstawie wniosków wyciągniętych z analizy, wybrano jeden wariant geometryczny struktury, na którego podstawie wykonano próbkę pomiarową w celu przeprowadzenia walidacji pomiarowej wykonanych symulacji.

2. Przebieg symulacji

W programie COMSOL wykonano model struktury w kilku wariantach geometrycznych, różniących się między sobą średnicą wtrąceń periodycznych. Wtrącenia przyjęte zostały jako rurki aluminiowe o ścianie szerokości 1 mm dla wariantów, w których ich średnica osiągała wartości większe niż 1,5 mm, natomiast z powodu

niewielkich rozmiarów, dla pozostałych przypadków zostały one zamodelowane jako wypełnione pręty. Schemat obu przypadków przedstawiono na Rysunku 1 a) oraz b). Model wykonano w formacie dwuwymiarowym, poprzez założenie, że w trzecim kierunku jest on ciągły. Materiał podstawowy, którym jest materiał porowaty, zamodelowano jako ciało stałe, jednak przyjmując parametry materiałowe jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych wartości materiału porowatego, natomiast wtrąceniom zostały przypisane wartości odpowiadające parametrom materiałowym aluminium. Szerokość struktury dla wszystkich przeprowadzonych symulacji, jak i odległość pomiędzy wtrąceniami, miały wartość równą 30 mm. Model po obu stronach zakończony był warstwą bezechową, wymuszenie nadane zostało falą płaską po jednej stronie struktury, zaznaczonej na kolor niebieski na Rysunku 1 c). Analiza przeprowadzona na podstawie wykonanego modelu obejmowała wykonanie krzywych dyspersji oraz tłumienia przenoszenia.

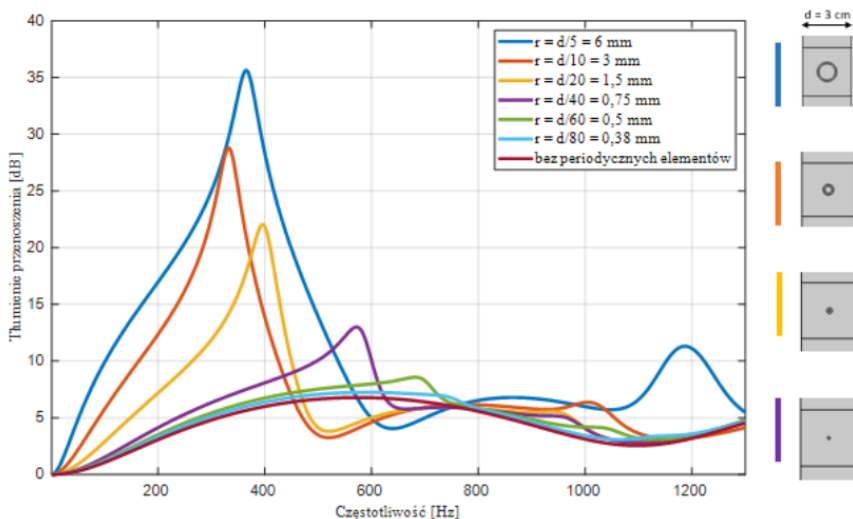


Rysunek 1: Schemat poglądowy struktury dla wtrąceń a) wypełnionych oraz b) pustych środkiem, c) schemat modelu wykonanego w programie COMSOL dla dwóch wariantów: samego materiału porowatego oraz dla materiału porowatego wraz z wtrąceniami aluminiowymi pustymi w środku

3. Wyniki symulacji

Wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na Rysunku 2. Porównano wartości tłumienia przenoszenia dla sześciu wariantów geometrycznych struktury oraz dla samego materiału porowatego w celu lepszego zobrazowania działania struktury. Zauważyć można zdecydowany wzrost wartości tłumienia przenoszenia dla struktury, szczególnie w paśmie 200 – 500 Hz, wraz ze zwiększeniem średnicy wtrąceń. Dla struktury o największej średnicy, tj. 6 mm, tłumienie osiągało wartości

szczytowe ponad 35 dB dla częstotliwości ok. 350 Hz. Jest to zdecydowana poprawa w stosunku do wartości otrzymywanych w tym zakresie przy użyciu samego materiału porowatego, które zawierały się w przedziale 2 – 7 dB.



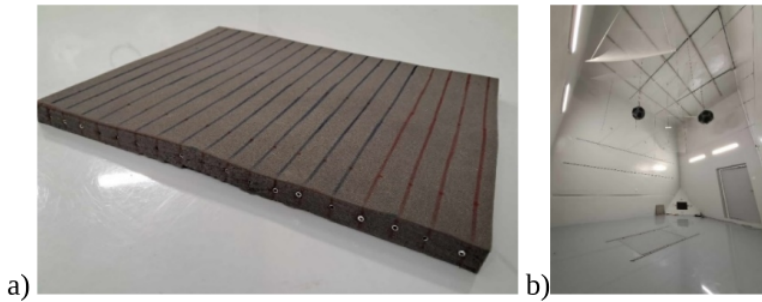
Rysunek 2: Porównanie wartości tłumienia przeniesienia dla struktury soft solid z periodycznymi wtrąceniami o różnych średnicach

3.1. Wykonanie próbki pomiarowej oraz przeprowadzenie pomiarów

W celu weryfikacji wykonanych symulacji wykonano próbkę pomiarową, wzorując się na wariacie z najkorzystniejszymi wynikami z etapu obliczeń numerycznych. Skonstruowana próbka pomiarowa miała wymiary 450 mm x 500 mm, o głębokości 30 mm. Wzdłuż dłuższej krawędzi pianki wycięto otwory w regularnych odstępach 30 mm, w których następnie umieszczono pręty aluminiowe o średnicy 6 mm i szerokości ścianki 1 mm. Wykonaną próbkę przedstawiono na Rysunku 3 a). Następnie przeprowadzono pomiary w oknie pomiarowym w komorze pogłosowej w Laboratorium Akustyki Technicznej w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie [4,5]. Wartości tłumienia przeniesienia wyznaczane zostały na podstawie różnicy zmierzonego poziomu ciśnienia akustycznego w komorze pogłosowej małej, w której znajdowało się źródło dźwięku oraz komorze pogłosowej dużej (1). Współczynnik izolacyjności akustycznej obliczony został według wzoru:

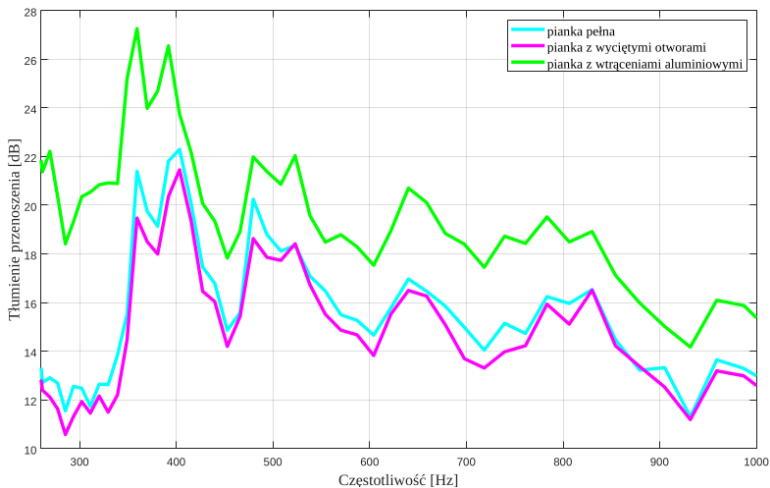
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (1)$$

gdzie: L_1 to poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym, [dB]; L_2 to poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym, [dB]; S to pole powierzchni próbki, [m²], A to równoważne pole dźwiękochłonne próbki, [m²].



Rysunek 3: a) Wykonana próbka pomiarowa b) zdjęcie komory pogłosowej podczas wykonywanych pomiarów

Przeprowadzono trzy serie badań. Zmierzono samą jednorodną piankę akustyczną, następnie piankę z wyciętymi otworami, a ostatecznie strukturę z umieszczonymi w piance aluminiowymi prętami. Dla każdej z serii przeprowadzono pomiary trzykrotnie a następnie uśredniono wyniki dla zwiększenia dokładności badań. Podczas pomiarów użytym sygnałem był szum różowy, dlatego w celu uzyskanie przejrzystych wyników uśredniono otrzymane wartości w zakresie 260 – 1000 Hz do wartości środkowych częstotliwości pasm 1/24-oktawowych. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4: Wyniki pomiarów dla 3 wariantów: pianki jednorodnej, pianki z wyciętymi otworami oraz pianki z wtrąceniami periodycznymi

Wartości otrzymane podczas pomiarów potwierdzają wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych symulacji. Zaobserwowano zdecydowany wzrost wartości tłumienia w paśmie 200 – 400 Hz dla struktury z periodycznymi wtrąceniami

w stosunku do wartości otrzymanych dla pianki jednorodnej. Wartość maksymalna dla struktury uzyskana została dla częstotliwości ok. 350 Hz i wynosi ona ponad 27 dB.

4. Podsumowanie

W pracy wykonano analizę struktury soft solid z periodycznymi wtrąceniami za pomocą symulacji przeprowadzonych na podstawie wykonanego modelu w programie COMSOL, a następnie zweryfikowano otrzymane wartości ścieżką pomiarową. Wnioski wyciągnięte na podstawie symulacji jak i pomiarów pokryły się ze sobą, w obu przypadkach zaobserwowano zdecydowany wzrost izolacyjności w paśmie niskich częstotliwości dla badanej struktury metamateriałowej. Wartości szczytowe zostały osiągnięte dla podobnych częstotliwości – ok. 350 Hz, natomiast różniły się wartościami, co może wynikać z własności próbki pomiarowej, jako że był to pierwszy prototyp struktury. Rozbieżności w wartościach tłumienia dla symulacji oraz pomiarów w częstotliwościach powyżej 400 Hz wynikały z faktu, że program COMSOL nie uwzględnia sztywności materiału porowatego. W przyszłości planowane jest rozszerzenie pracy o analizę wpływu zmiany innych wymiarów geometrycznych struktury oraz ich optymalizację, a następnie na jej podstawie wykonanie kolejnej próbki pomiarowej oraz jej weryfikacji pomiarowej.

Bibliografia

- [1] G. Ma, P. Sheng, *Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons*, Science advances, 2016, 2(2), .
- [2] N. Aberkane–Gauthier, V. Romero–García, D. Lecoq, M. Molerón, C. Lagarrigue, C. Pézerat, *Soft solid subwavelength plates with periodic inclusions: Effects on acoustic Transmission Loss*, Journal of Sound and Vibration, 2024, 571, 118005.
- [3] T. Brunet, J. Leng, O. Mondain–Monval, *Soft acoustic metamaterials*, Science, 2013, 342(6156), 323–324.
- [4] K. Chojnacka, A. Kras, T. Kamisiński, *Sound transmission loss calculation for metamaterial plate using combined analytical and numerical approach*, Vibrations in Physical Systems, 2022, 33(3).
- [5] Stanowisko do badania parametrów akustycznych małogabarytowych próbek zwłaszcza izolacyjności akustycznej – [Workstand for testing acoustic parameters of small-sized samples, preferably the acoustic insulation properties] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; wynalazca: Tadeusz KAMISIŃSKI, Tomasz Czubak. – Int.Cl.: G01N 29/11(2006.01). – Polska. – Opis patentowy; PL219788B1; Udziel. 2014-11-05; Opubl. 2015-07-31. – Zgłosz. nr P.393868 z dn. 2011-02-07.

Wyniki pomiarów pilotażowych hałasu w wybranych pomieszczeniach szpitalnych

Aleksandra Sawczuk, Jadwiga Hyla, Wiktoria Potoniec, Wojciech Kotala, Tadeusz Wszolek

asawczuk@student.agh.edu.pl

AGH w Krakowie

Abstract Hałas w środowisku szpitalnym, generowany przez aparaturę medyczną, rozmowy personelu, a także działające urządzenia technologiczne, stanowi przeszkodę w efektywnym powrocie do zdrowia przebywających tam chorych. Długotrwałe narażenie pacjentów na nadmierny hałas może prowadzić do zaburzeń snu, stresu oraz utrudniać rekonwalescencję po zabiegach medycznych. W związku z tym zapewnienie odpowiedniego poziomu hałasu w szpitalach jest istotnym krokiem w kierunku poprawy komfortu pacjentów i efektywności leczenia. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań akustycznych przeprowadzonych w jednym z krakowskich szpitali, mających na celu ocenę poziomów hałasu w różnych pomieszczeniach, takich jak sale chorych oraz punkty pielęgniarskie i wskazanie ich głównych źródeł. Podstawą analizy są wyznaczone poziomy równoważne, maksymalne oraz poziomy statystyczne poziomy ważonych A w ciągu doby. Przedstawiono również propozycje dalszych etapów prac nad projektem.

1. Wprowadzenie

Ze względu na specyfikę miejsca, wartości poziomów hałasu w budynkach szpitalnych podlegają restrykcyjnym wartościom dopuszczalnym [2,7]. Pomimo tego, na podstawie raportów oraz doniesień literaturowych można zaobserwować duży problem z hałasem na terenie szpitala, który narasta na przestrzeni lat [4]. Jako główne źródła zakłóceń najczęściej wskazywana jest obecność aparatury medycznej, jak również rozmowy pacjentów, personelu medycznego oraz odwiedzających [8]. Podwyższony poziom hałasu w szpitalach przekłada się bezpośrednio na jakość pobytu pacjentów. Wpływa on nie tylko na utrudnioną komunikację pomiędzy personelem medycznym, która może powodować problemy w szybkim wyleczeniu pacjenta [6], ale również wpływa na jakość snu chorych. W literaturze wykazano, że pacjenci przebywający w szpitalu śpią krócej, niż w domu, a sam sen jest mniej efektywny i niższej jakości [3,8]. Dźwięki elektroniczne wyposażenia medycznego powodują wybudzenia chorych, ponieważ podczas snu nie następuje aklimatyzacja do ekspozycji na tego rodzaju hałas, nawet jeżeli jest on powtarzalny [3]. Ponadto niedobór snu może zwiększać wrażliwość na ból, osłabiać układ odpornościowy i utrudniać powrót do zdrowia, a także powodować rozdrażnienie, wzmożony stres, wzrost ciśnienia krwi [1,3,8]. Co więcej, wszystkie skutki wynikające z nadmiernego hałasu w pomieszczeniach szpitalnych mogą zwiększać prawdopodobieństwo wystąpienia delirium, które stanowi dodatkowe i bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia i życia pacjentów.

W literaturze wykazano, że hałas w szpitalach przekracza dopuszczalne wartości [1,3,5]. Z tego powodu, w celu zapoznania się z przedstawionym problemem hałasu w szpitalach, zdecydowano się na wykonanie wstępnych pomiarów akustycznych na terenie jednego z krakowskich szpitali, które umożliwiły analizę wybranych parametrów statystycznych poziomów dźwięku, poziomu maksymalnego oraz równoważnego, a także zastawienie otrzymanych wartości z wartościami dopuszczal-

nymi. Pomiary monitoringowe obejmowały pomiary ciągłe, kilkunastogodzinne dla poszczególnej lokalizacji miernika. Analiza danych pozwoliła na zapoznanie się ze skalą problemu w badanej jednostce oraz podjęcie decyzji na temat dalszych działań dążących do zmniejszenia dokuczliwości hałasu na terenie obiektu.

2. Metodyka pomiarów akustycznych

2.1. Szkic sytuacyjny

Badania akustyczne wykonywane w październiku 2024 roku obejmowały pomiary poziomów statystycznych, poziomu równoważnego oraz maksymalnego na terenie dyżurki lekarskiej, punktu pielęgniarskiego oraz sal pacjentów. W trakcie badań wykonano pomiary w dwóch salach chorych – pierwsza z nich wyposażona była w aparat CPAP umożliwiający prawidłowe oddychanie u pacjenta, gdzie włączony był alarm na monitorze przy łóżku, co powodowało dodatkowy element dźwięku w pomieszczeniu. Ponadto w sali w godzinach od 10:00 do 11:00 nie przebywali pacjenci. W drugiej sali chorych nie znajdowały się żadne urządzenia generujące niepożądany dźwięk. Pomiary wykonywano miernikiem poziomu dźwięku Svan 959, klasy 1.

2.2. Wartości dopuszczalne dla analizowanych pomieszczeń szpitalnych

Ze względu na rodzaj wykonywanych świadczeń, obiekty szpitalne objęte są rygorystycznymi wymaganiami oraz zaleceniami dotyczącymi wartości poziomu dźwięku w salach chorych, ale również w pomieszczeniach zabiegowych, czy gabinetach lekarskich. Zgodnie z wartościami dopuszczalnymi podawanymi w normie [7] wyróżniono 3 rodzaje wartości dla poszczególnych pomieszczeń:

- w przypadku sal łóżkowych równoważny poziom dźwięku A L_{Aeq} nie powinien przekraczać 25 dB, a maksymalny poziom dźwięku A L_{AFmax} wartości 30 dB,
- poziom L_{Aeq} nie powinien przekraczać 35 dB w pomieszczeniu pielęgniarek, gabinetach lekarskich, gabinetach zabiegowych, w salach do zajęć rehabilitacji ruchowej,
- poziom L_{Aeq} nie powinien przekraczać poziomu 30 dB w pomieszczeniach oddziału intensywnej opieki medycznej OIOM.

W przypadku wartości zalecanych przez World Health Organization [2] wyróżnia się dwa przepisy:

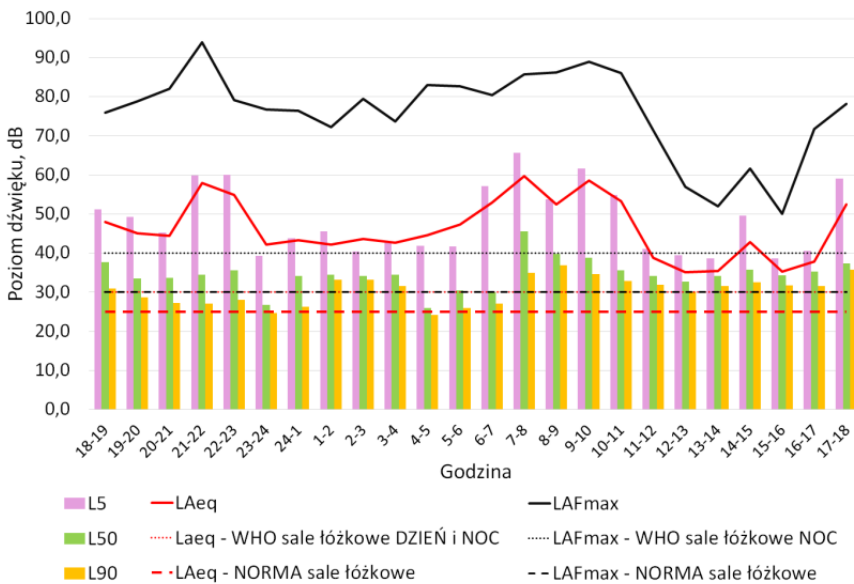
- zaleca się nieprzekraczanie wartości 35 dB dla poziomu L_{Aeq} w trakcie pory dziennej w pokojach badań,
- dla sal łóżkowych podczas pory nocnej zaleca się, by poziom L_{AFmax} nie przekraczał 40 dB, a poziom L_{Aeq} wartości 30 dB zarówno dla pory dziennej, jak i nocnej.

2.3. Metodyka pomiarowa i obliczeniowa

W ramach analizy wyznaczono wartości równoważnego poziomu dźwięku A, który reprezentuje średni poziom hałasu w czasie pomiaru, poziomie maksymalnego, a także poziomów statystycznych, wskazujących wartość hałasu, która jest przekraczana przez wybrany procent czasu obserwacji. Wartości uzyskane w pomiarach zestawiono na jednym wykresie wraz z wartościami zalecanymi oraz dopuszczalnymi wymienionymi w rozdziale 2.2 artykułu.

3. Analiza wyników

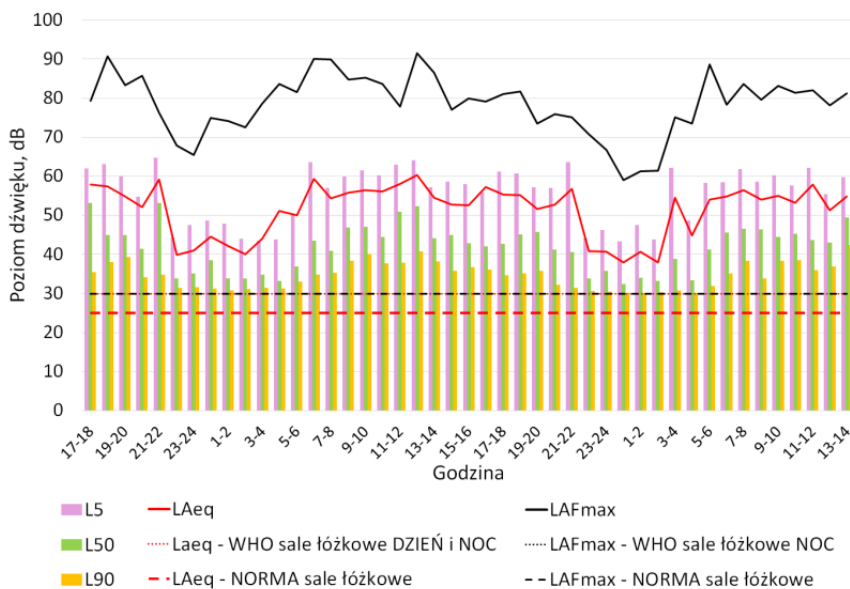
Pomiary wykonywano w sposób ciągły w wytypowanych pomieszczeniach oddziału, w celu obserwacji hałasu na przestrzeni doby. Analizie poddano równoważny poziom dźwięku A (L_{Aeq}), maksymalny poziom dźwięku A (L_{Amax}) oraz poziomy statystyczne L5, L50 i L90 ważone krzywą A. Uzyskane w trakcie pomiarów wartości zestawiono z wartościami normowymi [7] i zaleceniami WHO [2].



Rysunek 1: Wyniki pomiarów w sali chorych wyposażonej w aparaty CPAP zestawione z wartościami normowymi [7] i zalecanymi przez WHO [2]

Równoważny poziom dźwięku A zarówno w sali chorych wyposażonej w aparaty CPAP (rys. 1), jak i w drugiej z badanych sal chorych (rys. 2) przez cały czas pomiaru oscylował w zakresie 40 – 60 dB, przekraczając zarówno normy budowlane, jak i zalecenia WHO dla każdej z godzin. W przypadku sali wyposażonej w aparaturę CPAP widoczny jest zdecydowany wzrost równoważnego poziomu dźwięku A przed

godzinami nocnymi 20:00 – 22:00 oraz w godzinach porannych 06:00 – 11:00, co najprawdopodobniej wynika z przeprowadzanych badań pacjentów oraz obchodów lekarskich. Maksymalny poziom dźwięku również w żadnym momencie pomiaru nie spełniał zaleceń WHO.

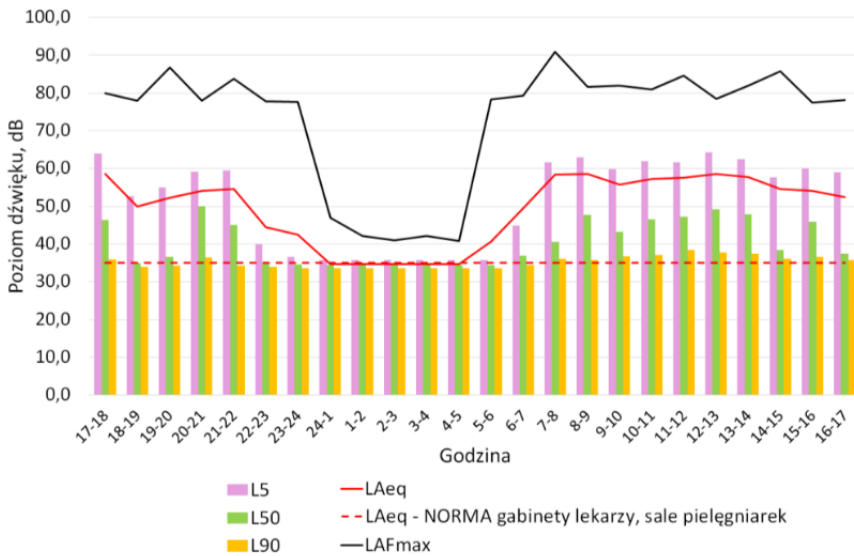


Rysunek 2: Wyniki pomiarów w sali chorych zestawione z wartościami normowymi [7] i zalecanymi przez WHO [2]

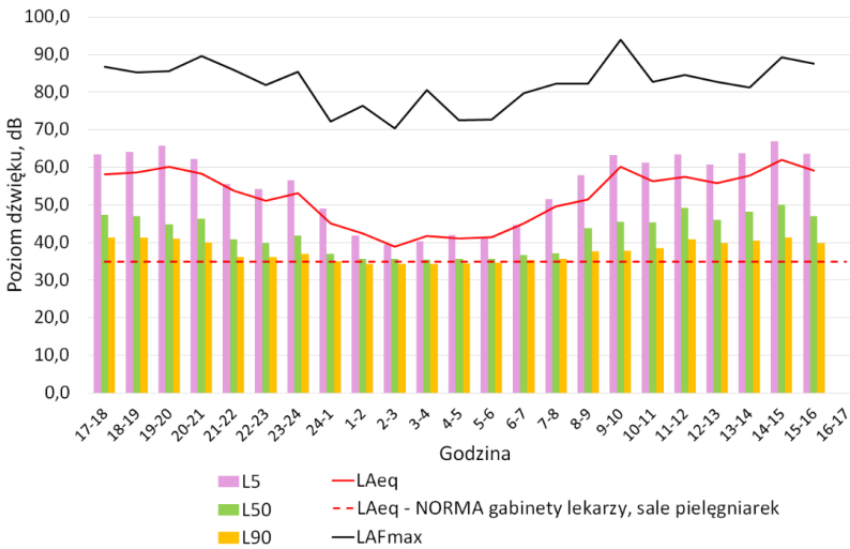
W drugiej sali chorych, z powodu dłuższego czasu pomiaru, widoczny jest powtarzający się spadek poziomu hałasu występujący w godzinach 22:00 – 02:00, spowodowany rozpoczęciem się godzin nocnych, brakiem odwiedzających oraz zmniejszoną aktywnością personelu i samych pacjentów. W tym pomieszczeniu wartości poziomu L_{Aeq} utrzymują się na zbliżonym poziomie przez cały okres trwania pory dziennej.

Oba badane pomieszczenia charakteryzuje odstęp równoważnego poziomu dźwięku A od maksymalnego poziomu dźwięku A na poziomie 20 – 30 dB, świadczące o występowaniu krótkich zdarzeń o wysokim poziomie dźwięku, mogących być szczególnie uciążliwymi w godzinach nocnych. Wysokie różnice w poziomach L90 i L5 występujące w każdej godzinie pomiaru również wskazują na nieregularność (duży rozrzut) hałasu i obecność krótkich zdarzeń o wysokim poziomie dźwięku.

Równoważny poziom dźwięku A oraz maksymalny poziom dźwięku A w dyżurce lekarskiej (rys. 3.) przez prawie cały czas trwania pomiaru przekracza wartości normowe. W godzinach nocnych 24:00 – 05:00 widoczny jest zdecydowany spadek poziomów dźwięku w pomieszczeniu. Dopiero w tym czasie równoważny poziom dźwięku, jak i poziomy statystyczne zrównują się z wartością normatywną równą 35 dB.



Rysunek 3: Wyniki pomiarów w dyżurce lekarskiej zestawione z wartościami normowymi [7]



Rysunek 4: Wyniki pomiarów w punkcie pielęgniarskim zestawione z wartościami określonymi w normie [7]

Podobne wyniki otrzymano w punkcie pielęgniarskim (rys. 4.), jednakże w tym pomieszczeniu spadek poziomu hałasu w nocy jest niższy, niż w dyżurce. Dla punktu pielęgniarskiego nie osiągnięto wartości normowych w żadnej z analizowanych godzin. Dodatkowo zarówno w przypadku tego pomieszczenia, jak i dyżurki lekarskiej, podobnie do sal chorych, widoczna jest duża różnica zarówno pomiędzy równoważnym, a maksymalnym poziomem dźwięku A, jak i poziomami statystycznymi L90 i L5. Poziomy L90 w dyżurce lekarskiej oraz w punkcie pielęgniarskim w każdej zmierzonej godzinie przekraczają lub są niewiele poniżej wartości normowej.

Należy podkreślić, że choć otrzymane wyniki mają charakter orientacyjny i nie można ich wprost porównywać do wartości dopuszczalnych, obrazują problem nadmiernego hałasu w badanej jednostce.

4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają obserwacje z innych szpitali wskazujące na występowanie nadmiernego hałasu, zarówno w salach chorych, jak i pomieszczeniach personelu. Hałas w salach łóżkowych mieści się w granicach 35 – 60 dB L_{Aeq} i 50 – 95 dB L_{AFmax} przekraczając przez większość czasu poziomy 25 dB L_{Aeq} i 30 dB L_{AFmax} zadane w normie budowlanej PN-B-02151-2:2018-01 [7], oraz poziomy 30 dB L_{Aeq} i 40 dB L_{AFmax} zalecane przez WHO w dokumencie *Guidelines for community noise* [2]. Zmierzone poziomy L_{Aeq} w gabinecie lekarskim oraz sali pielęgniarek mieszczą się w tych samym granicach, co poziomy zmierzone w salach łóżkowych ze spadkiem w godzinach nocnych 24:00 – 5:00, gdzie w przypadku gabinetu lekarskiego zrównują się z poziomem normatywnym – dla sal pielęgniarek i gabinetów lekarskich 35 dB L_{Aeq} [7]. W pozostałych godzinach występują ciągłe przekroczenia w zakresie 35 – 60 dB L_{Aeq} .

Wykonane pomiary mają charakter rozpoznawczy, ale w jasny sposób sygnalizują występowanie problemu z hałasem w szpitalu i wykazują potrzebę wykonania szerszych pomiarów analizujących poziomy hałas w dłuższych przedziałach czasowych i większej liczby punktów. W celu lepszego zrozumienia problemu należałoby zidentyfikować źródła hałasu w poszczególnych pomieszczeniach oraz przeprowadzić ankietyzację sprawdzającą wpływ zmierzonego hałasu na samopoczucie pacjentów i personelu.

Bibliografia

- [1] A. Aydin Sayilan, N. Kulakac, S. Sayilan, *The effects of noise levels on pain, anxiety, and sleep in patients*, Nursing in Critical Care, 2021, 26(2), 79–85.
- [2] B. Berglund, T. Lindvall, D.H. Schwela, *Guidelines for Community Noise*, Geneva, World Health Organization, 1999.
- [3] R. Bevan et al., *Sleep quality and noise: comparisons between hospital and home settings*, Archives of disease in childhood, 2019, 104(2), 147–151.

- [4] I.J. Busch–Vishniac et al., *Noise levels in Johns Hopkins hospital*, The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(6), 3629–3645.
- [5] E. de Lima Andrade et al., *Environmental noise in hospitals: a systematic review*, Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28, 19629–19642.
- [6] M. MacLeod, J. Dunn, I.J. Busch–Vishniac, J.E. West, A. Reedy, *Quieting Weinberg 5C: A case study in hospital noise control*, The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(6), 3501–3508.
- [7] PN-B-02151-2:2018-01, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
- [8] H.M. Wesselius et al., *Quality and quantity of sleep and factors associated with sleep disturbance in hospitalized patients*, JAMA Internal Medicine, 2018, 178(9), 1201–1208.

Indeks autorów

Ambroziński Ł., 5, 39
Amoran A., 6

Bień M., 7
Bismor D., 6, 43

Chojnacka K., 9, 55, 57, 75, 89
Chojnacki B., 11
Czesak K., 13

Delekta R.J., 15
Derżko M., 16

Falińska K., 17
Flach A., 18, 42
Frączkowska A., 53, 61

Gorazd Ł., 19
Grygiel J., 37

Hyla J., 54, 58, 69, 95

Idczak J., 20

Jasiński J., 37

Kamisiński T., 20, 46
Kijanka P., 21
Kin M., 53, 56, 61, 81
Kleczkowski P., 13
Kmieciak M., 25
Kopeć S., 55, 75
Korytowski A., 25
Kotala W., 58, 95
Kozłowski E., 35
Krejczka O., 34
Król-Nowak A., 13
Książek P., 23

Kucejko M., 25
Kuczak D., 56, 81

Małecki P. *AGH*, 27
Małecki P. *PW*, 28, 29
Maciuszek A., 57, 89
Matyjewski M., 28
Mazurkiewicz P., 31
Melnyk M., 42

Nurzyński J., 33

Perz R., 28, 29
Pietrzak A.P., 28
Pik P., 11
Pilch A., 16, 34
Pleban D., 35
Pluta M., 37
Potoniec W., 58, 95
Pyzik P., 5, 39

Radosz J., 35, 41
Rubacha J., 20, 42, 46, 54, 69

Sawczuk A., 58, 95
Szlachetko B., 23
Szmyd G., 48

Tessema S.H., 43
Tokarczyk D., 37
Trojanowski R., 44

Wójtowicz A., 46
Wszolek T., 48, 58, 95

Zakrzewski F., 28, 29
Ziółkowski B., 35

Organizatorzy



Polskie Towarzystwo Akustyczne
Oddział w Krakowie



Katedra Mechaniki i Wibroakustyki AGH



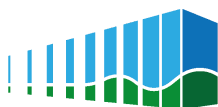
Sponsorzy



International Commission for Acoustics



Committee on International Research and Education
of the Acoustical Society of America



EPUFLOOR

AKUSTYKA

EpuFloor Sp. z o.o.