
XXVI KONFERENCJA INŻYNIERII AKUSTYCZNEJ I BIOMEDYCZNEJ

ORGANIZOWANA PRZEZ
Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie

MATERIAŁY KONFERENCYJNE

KRAKÓW – ZAKOPANE
19 – 22 MARCA 2024

Komitet Naukowy

Janusz Piechowicz – *Przewodniczący*

Adam Pilch – *Sekretarz naukowy*

Wojciech Batko

Adam Brański

Ireneusz Czajka

Tadeusz Kamisiński

Iwona Kochańska

Janusz Kompała

Mirosław Meissner

Artur Nowosiwiat

Krzysztof Opieliński

Michał Pawełek

Dariusz Pleban

Marek Pluta

Wojciech Rdzanek

Bartłomiej Stępień

Stefan Weyna

Jerzy Wiciak

Tadeusz Wszolek

Wiesław Wszolek

Komitet Organizacyjny

Adam Pilch

– *Przewodniczący*

Marek Pluta

Ireneusz Czajka

Bartłomiej Chojnacki

Marta Kucejko

Janusz Piechowicz

Bartłomiej Stępień

Katarzyna Suder-Dębska

Roman Trojanowski

Tadeusz Wszolek

Streszczenia referatów

Bezkontaktowe badanie sztywności tkanek miękkich z wykorzystaniem fal sprężystych wzbudzanych z wykorzystaniem siły radiacji akustycznej

Acoustic radiation force excited elastic waves for non-contact soft-tissue evaluation

Lukasz Ambroziński

ambrozin@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Tissue stiffness is an important parameter that allows for the assessment of potentially health-threatening changes in a patient. Manual palpation, which is the first and most common diagnostic method, does not provide an objective assessment or allow for tracking tissue stiffness. Therefore, elastography methods are being developed, utilizing measurements of the velocity of elastic waves.

In this presentation, a completely non-contact method for exciting and measuring to determine the stiffness of a medium waves will be presented. A focused ultrasonic transducer operating in air is used as the source, allowing the generation of acoustic radiation force on a small tissue surface area. The resulting guided wave can be recorded using laser techniques, rendering the method entirely non-contact. The presentation will cover experiments involving wave excitation in phantoms simulating soft tissues, as well as results from ex-vivo corneal studies.

Charakterystyka akustyczna aparatury do rezonansu magnetycznego o mocy 1,5 tesli

Acoustic characterization of the 1.5 tesla MRI facility in Mobile Imaging Trailer

Swapnil Arawade, Janusz Piechowicz

sarawade@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

The Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a very important medical tool for diagnosis of the internal organs of the patient. The major problem associated with MRI is its high acoustic noise during operation responsible for anxiety, discomfort and can be harmful for the patient as well as long exposure raises the safety concerns for the operating staffs. This study involves the characterization of the acoustic noise in the vicinity of 1.5 tesla Mobile Imaging Trailer–MRI system, aimed at evaluating the acoustic parameters in the examination room during scanning. The acoustic measurements were carried out using the microphones located inside the MRI examination room for variations of diffusion weighted imaging (DWI) gradient pulse sequences. The sound recordings depicted the waveforms of complex acoustic pulses with high SPL spikes of impulse nature. Results revealed equivalent SPL in the MRI examination room exceeds 90 dB and the peak noise was consistently above 101.5 dB and DWI-og scanning sequence reported peak sound pressure level of 105.9 dB. The dominance of the noise is identified in the frequency range of 500–3000 Hz for all scanning sequence. Results indicate that sound levels are high in the mobile scanning facility as compared to the stationary MRI in the hospitals. The acoustic noise in the control room and chiller room were also high. Given that these acoustic measurements surpass recommended noise standards, the significance of ear protection is emphasized. These results can be useful in designing the acoustic noise reduction strategies by using the acoustic–metamaterial panel to improve the patient comfort and safety.

Wpływ zjawiska Dopplera na sygnały akustyczne i drganiowe w aspekcie rozpoznania, typu i prędkości zbliżającego się samochodu

Effect of Doppler phenomenon for acoustic and vibration signals for task of recognition, types and speed of an approaching car

Rafał Burdzik, Diyar Khan, Łukasz Konieczny

rafal.burdzik@polsl.pl

Silesian University of Technology

This study investigates into the significant role played by the Doppler effect in the analysis of both noise and vibration signals. We aim to interpret how the choice of medium impacts the propagation of noise and vibration waves, specifically focusing on the differences between air and solid structures as mediums. In the case of noise signals, which are acoustic in nature, the medium of propagation is air, and the waves travel through this medium. Conversely, for vibration signals, the medium for wave propagation is a solid structure, such as asphalt, bricks, tuff tiles, or even soil. Our study aims to understand how the Doppler phenomenon changes with different materials for noise and vibration. By thoroughly examining how noise and vibration signals behave in various environments, we aim to shed light on the complexities of Doppler effects in both types of signals. This deeper understanding has the potential to inform numerous applications, including transportation systems, infrastructure development, and environmental monitoring efforts. Through experimental research and thorough analysis, we endeavor to interpret the complex relationship between the Doppler effect, medium choice, and the characteristics of noise and vibration signals aiming to reduce its effect. Our findings could have far-reaching implications for a wide range of fields, paving the way for more effective and accurate noise and vibration analysis techniques.

Analiza możliwości skalowania komórek podstawowych metamateriałów z rezonatorami objętościowymi

The analysis of scaling unit cells of cavity-based metamaterials

Aleksandra Chojak

achojak@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Cavity-based metamaterials are a relatively novel type of resonant materials described in the literature. Because of their thickness, decreased in comparison with the sound-absorbing and sound-diffusing panels classically used in room acoustics, they are gaining more and more popularity. As it has already been shown, scaling such materials with the use of similarity criteria derived in the classical dimensional analysis is impossible, due to the increasing significance of thermo-viscous losses in the measurement conditions in at-scale acoustics models. The paper discusses the possibilities of scaling unit cells of cavity-based metamaterials, with the use of a novel approach. The importance of using end corrections for scaling both quarter wavelength and Helmholtz resonators was studied. The obtained results were verified based on the numerical simulations in FEM.

Metamateriały wibroakustyczne o zmiennym efektywnym zakresie częstotliwości do zwiększania izolacyjności akustycznej przegród

Vibroacoustic metamaterial for enhanced Sound Transmission Loss with variable frequency range

Klara Maria Chojnacka

klara.chojnacka@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Recently, vibroacoustic metamaterials have been broadly investigated, especially for noise and vibration mitigation. By creating a band gap effect in flexural wave propagation in a base element, metamaterials improve its vibroacoustic parameters in low and mid frequency range while preserving low mass and structure dimensions. While the foundational assumptions and lab validations highlight the advantages of these metamaterials, the practical application of these structures in real-world scenarios remains a challenge. The main aspect that is widely investigated is achieving maximum effectiveness while maintaining the simplicity of geometry to optimize mass production costs. This work presents a vibroacoustic metamaterial design with geometry adapted to serial production using injection molding. The proposed geometry allows for adjusting the effective frequency range of the structure after the production process. Due to the distinctive configuration of the elements and the grouping of unit cells, the design facilitates the generation of broadband and multi-band structures as well. Numerical simulations were employed to assess the impact of the proposed metamaterial on Sound Transmission Loss and other vibroacoustic parameters. Experimental validation of prototype effectiveness was conducted through sound insulation measurements in a diffuse field.

Metoda dopasowania impedancji przetwornika piezoelektrycznego do zwiększenia skuteczności źródeł dźwięku na potrzeby modeli w skali

Impedance matching method in piezoelectric transducers for use in acoustic sources for scale modelling

Bartłomiej Chojnacki, Damian Kosz

bchojnacki@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Piezoelectric transducers are common in acoustic measurements in the ultrasonic frequency range, including scale modelling methods. Because their capacitive impedance characteristics are non-matched to typical audio amplifiers, it is difficult to receive high gain and output SPL. The references described the methods for improving the output sensitivity for piezoelectric transducers, but the previous works were typically performed in a much higher frequency range (around 1 MHz) and were applied only for the resonant region. There is a lack of research for similar methods in the typical frequency range for acoustic scale modelling, such as 1–80 kHz. The current work describes the methods for capacitive impedance correction in piezoelectric transducers to improve the sensitivity of acoustic signal processing. The equivalent circuits of piezoelectric transducers and the Smith diagrams provide the parameters for previously developed algorithms found in the references. The selected impedance compensation circuits were designed and tested in an anechoic chamber, investigating the possible gains in the acoustic output modifications. The impedance matching circuits can increase the output signal gain by over 10 dB in a single transducer across the wide frequency range (40–80 kHz), which significantly improves using this kind of transducer in acoustic scale modelling.

Modelowanie numeryczne idiofonów ceramicznych

Numerical modelling of ceramic idiophones

Ireneusz Czajka, Katarzyna Suder-Dębska

iczajka@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Ceramic idiophones are a significant part of the remains of earlier cultures. Such finds provide a lot of information about the life of people in ancient or even pre-historic times. Based on those finds, conclusions can be drawn about the level of technological advancement, sense of aesthetics and sound perception. The discovered monuments are often damaged and it is not possible to directly use their sound functions. For this reason, it is worth to use numerical modeling to reproduce the sound of damaged artifacts. Many more and less complex problems arise when modeling ceramic idiophones is conducted. The most important of these problems are: acquiring information about the parameters of the materials used, the shape of the object and wall thicknesses. The article will present methods for solving the mentioned problems.

Próba oceny ilościowej modulacji częstotliwości (FM) w zastosowaniu do oceny dokuczliwości hałasu turbin wiatrowych

A study to measure the frequency modulation (FM) of wind turbine noise and assess its impact on annoyance

Marcjanna Czapla, Tadeusz Wszolek

mzczapla@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

The acoustic signal of a wind turbine (WT) is characterized by variability in the level of generated noise. This phenomenon arises from the cyclical movement of the rotor blades, which can vary in speed depending on the turbine's rotational speed. Blade motion under varying atmospheric conditions generates different phenomena, notably amplitude modulation (AM) and frequency modulation (FM). While AM in WT signals has been extensively studied, FM remains poorly understood, thus this study focuses on the quantitative assessment of frequency modulation in recorded signals from wind turbines. The assumptions of the frequency modulation (FM) phenomenon parameterization process are outlined, along with a proposed algorithm for calculating modulation depth. Methodological and metrological justifications, as well as the measurement approach for this phenomenon, are provided. Sample calculations of FM depth are presented alongside AM depth. The results serve as the basis for verifying the adopted algorithm regarding its utility in assessing the impact of FM on WT noise annoyance. Identification and determination of parameters describing FM are demonstrated through several examples, and the verification of FM's impact on annoyance will be conducted through listening tests in subsequent stages of researching this phenomenon.

Nowe metody parametryzacji głośników modów rozproszonych

New methods for parameterization of Distributed Mode Loudspeakers

Karol Czesak, Piotr Kleczkowski

czesak@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Distributed Mode Loudspeakers (DMLs) operate by bending oscillations of a plate with specifically designed dimensions and stiffness. They exhibit specific transfer functions, which need to be described with a series of amplitude–frequency characteristics measured at points located across a measurement hemisphere. The measurement results of the same transducer, taken at closely spaced points, can significantly differ from each other. The amplitude–frequency characteristic measured along a perpendicular axis passing through the centre of the loudspeaker does not exhibit the best properties when compared to characteristics measured at other measurement points in the hemisphere. The aim of this work was to develop numerical parameters that qualitatively describe the amplitude–frequency characteristics of a DML measured at individual points in the measurement hemisphere. These parameters, plotted in a way showing their relation to directions, are intended to identify the directions where the radiation of a DML exhibits properties closest to desired ones. This will facilitate the assessment of particular types of speakers and the comparison among competitive solutions. The formulated quantities are based on a parameterization model developed for conventional piston loudspeakers, specifically relating to the flatness of amplitude responses, for which the correlation with listener preferences has been observed. The proposed parameters were used to describe a DML, whose amplitude characteristics were measured at 325 points in the hemisphere with a constant angular resolution of 10° .

Aparatura i możliwości pomiarowe GUM w dziedzinie ultradźwięków

GUM's equipment and measurement capabilities in the field of ultrasound

Katarzyna Falinska

katarzyna.falinska@gum.gov.pl

GUM

The paper presents measuring equipment for calibration and testing in the field of medical ultrasound, installed at the Central Office of Measures (GUM), developed and delivered by the National Physical Laboratory (NPL), UK. The purchased equipment creates two measurement set up. The measurement set up of the primary ultrasonic power standard, it allows for measurement output power of ultrasound transducer by Radiation Force Balance method. And the measurement set up for calibration of ultrasonic hydrophones using a comparison method (secondary method). This paper discusses the measurement possibility of both systems. This paper also presents the results of verification of both measurement set up.

Zmienna interpretacja procesu intonacji oraz pola akustyczno–fizjologicznego w trakcie głosowym śpiewaków

Variable interpretation of the intonation process and the acoustic–physiological field in the vocal process of singers

Mateusz Gawlik, Wiesław Wszolek*, Zdzisław Madej***

mateogawel@gmail.com

*AGH University of Kraków, **AMKP – Akademia Muzyczna

During sound phonation at a certain height of the human voice scale for all types of voices (soprano, alto, tenor bass) and at varying pitches in the scale, the vocal folds vibrate as a result of which there is a precise interaction of these muscles that are active in the phonation process. The study analyzed the acoustic and EEG signals of 36 singers with varying degrees of vocal apparatus training. Time and frequency differences of the analyzed waveforms were observed. 5 phenomena illustrating the correctness of emission have been distinguished. The conducted research is an introduction to a full description of the singer's parametric vocal channel, which in the future will be used by the authors to create an acoustic image of the voice.

Eksperymentalne wyznaczenie wpływu modyfikacji zakończenia falowodu na impedancję akustyczną wylotu

Experimental determination of the effect of duct termination modification on the outlet acoustic impedance

Łukasz Gorazd

gorazd@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

The work presents experimental research on the possibility of limiting acoustic wave radiation through the waveguide termination depending on its modification. Modifications aimed at changing the direction of wave propagation are one of the ways to noise protection while determining the outlet impedance allows quantitative evaluation. The measurement setup and measurements were prepared and performed in analogy to measurements carried out in an impedance tube using the transfer function method. The results of experimental research on the outlet impedance of the waveguide for various modifications of terminations are presented.

Analiza wpływu elementów łącznych na współczynnik wypromieniowania dźwięku przez struktury warstwowe

The impact of adding steel stud elements on the radiation characteristics of double-leaf partitions

Julia Idczak, Jarosław Rubacha, Tadeusz Kamisiński

idczak@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Double-leaf partitions, which consist of two parallel plasterboard plates connected by steel studs, are commonly used in building construction. Different studies have focused on the acoustic characteristics of these structures, and the effect of the steel stud is evident in transmission loss values or in unreduced impact sound transmission between plates. On the other hand, it has to be noted that the introduction of additional connections impacts the mobility of the plate on the radiating side of the structure, thereby influencing the radiation properties of the entire assembly. This study presents the main results from analyses conducted using two different types of excitation – an omnidirectional sound source and a shaker. The analysis contains the transmission loss and radiation index of the structure, accounting for the presence of studs, the total mass of the structure, and the type of excitation. Experimental results are compared against numerical data obtained from analyses performed using COMSOL Multiphysics software.

Wpływ warunków brzegowych na cechy sygnału akustycznego w płytach pogłosowych – koncepcja badań i wstępne wyniki

The influence of boundary conditions on acoustic signal features in reverberation plates – concept of study and initial results.

Adam Korytowski, Ryszard Olszewski

adamkor@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Mechanical vibrations of plates are used in many branches of science including in acoustics – for reverberation purposes. The paper takes up a topic of synthesis of artificial reverberation, one of the most important signal processors in audio engineering. Using a reverberation processor, it is convenient to have available adjustable features to simulate different types of phenomena depending on needs of the engineer. In this paper there are described results of measurements of a plate vibrations depending on its boundary conditions, and acoustic signals obtained by them. The measurements were performed using a test stand created for such experiments. It allows to implement different types of boundary conditions of the plate, as well as to excite the plate using an electrodynamic transducer and record the plate vibration using a contact microphone. Analysis of the acoustic signals obtained by the plate vibrations indicates that boundary conditions affect the signals features in terms of reverberation time as well as frequency content, which is perceptually significant for a listener.

Wpływ dekoracji na pogłosowość teatru dramatycznego

Influence of theatre stage set on reverberation in a drama theatre

Piotr Kozłowski

piotr.kozlowski@pwr.edu.pl

Wrocław University of Science and Technology

Stage decoration is mainly seen as a staging element that enables the creation of the visual layer of a theatrical performance. According to the classical approach, decoration should also serve to support the transmission of actors' voices from the stage space to the audience. Contemporary stagings are increasingly less concerned with such acoustic functional tasks of decoration, but this does not mean, however, that they remain unaffected by the acoustic conditions on stage and in the audience. The text presents the results of research carried out at the Teatr Polski in Wrocław, concerning the influence of various types of decorations on the reverberation conditions within the stage and the auditorium.

Wyzwania w zastosowaniu metod numerycznych w syntezie dźwięku czasu rzeczywistego

Addressing the challenges of numerical methods in real-time sound synthesis

Marta Kucejko

kucejko@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Sound synthesis employs various techniques to generate artificial sounds, with numerical methods and physical modeling standing out for their precision and versatility. These techniques are integral to creating realistic sounds, simulating not only the sound itself but also the instrument and the unique ways of its excitation, offering nuanced control over sound characteristics. Despite recent advancements linked to the rapid expansion of computing capabilities, real-time sound synthesis methods still face challenges in accurately and efficiently replicating complex acoustic systems. By analyzing the current state of numerical methods in sound synthesis and known issues surrounding them, this review highlights areas for improvement. It underscores the importance of addressing challenges such as numerical stability, handling complex geometries, and the nonlinear interaction between components in modeled instruments. In a broader context, understanding these unresolved problems in sound synthesis sets the stage for future research. This discourse encourages a cross-disciplinary approach to innovate and refine sound synthesis techniques, fostering new collaborations and discoveries that could transform audio engineering and related fields.

Modelowanie teoretyczne i analiza numeryczna procesu zaniku dźwięku w przestrzeniach sprzężonych

Theoretical modeling and numerical analysis of sound decay process in acoustically coupled spaces

Mirosław Meissner

mmeissn@ippt.pan.pl

IPPT PAN

The main aim of room acoustics is to predict reverberant properties of enclosures from measured or numerically simulated room responses. In this paper this issue was examined in low-frequency range where acoustic characteristics of rooms is strongly frequency dependent due to differences in a modal damping. A theoretical description of a decaying sound field was based on a modal expansion of the sound pressure and a reverberant response of the room was initiated by emission of Dirac delta time impulse or by switching off a pure-tone sound source. Theoretical findings were used to determine reverberant characteristics of enclosure containing two coupled rectangular subrooms. Simulation results have shown that a sound decay after turning off the pure-tone source is dominated by modes with frequencies close to the source frequency. The differences in the amplitude and damping of these modes make the sound decay very irregular. Thus, a monotonic decay curve was obtained by using numerical methods for smoothing and approximating data such as the discrete Hilbert transform and polynomial regression. A character of sound decay depends on the absorbing material distribution and when it is uniform, a convex nature of sound decay was noted. However, if a sound absorption in one of the subrooms was much smaller than in the other subroom, the sound decay became concave. Numerical simulations also revealed that in some one-third octave bands the decay function obtained via backward integration of squared room impulse response varies very nonlinearly. This effect makes it difficult to properly qualify the sound decay, because it is practically impossible to characterize the reverberation process with only one or at most two sound decay times.

Identyfikacja uszkodzeń maszyn wirnikowych przy wykorzystaniu metod głębokiego uczenia niewymagających danych treningowych z uszkodzeń

Fault identification of rotating machinery using deep learning methods not requiring fault training data

Paweł Pawlik, Konrad Kania*, Bartosz Przysucha***

pawlik@agh.edu.pl

**AGH University of Kraków, **Lublin University of Technology*

Deep machine learning methods are widely used in vibroacoustic diagnostics of rotating machinery. Classifier-based models are used to identify faults. These methods, however, require learning data sets recorded for the types of damage the model is designed to identify. Anomaly detection methods based on the autoencoder model can also be found in the literature. These methods do not need learning data from the damaged machine, but they can only detect damage, while they are not capable of identifying malfunctions. The paper presents a fault identification technique for rotating machines operating under variable conditions that do not require training data from faults. This method has been tested to identify degradation processes in a helical gearbox and misalignment and unbalance in a planetary gearbox. The proposed method showed better efficiency in diagnosing machines operating under variable conditions than the commonly used synchronous methods. The method presented in the paper is adapted for implementation in industrial diagnostic monitoring systems.

Analiza wrażliwości parametrów akustycznych Bazyliki Miłosierdzia Bożego w Krakowie–Łagiewnikach na modyfikacje materiałów adaptacyjnych

*Sensitivity analysis of acoustic parameters of Basilica of Divine Mercy
in Krakow–Łagiewniki to modification of treatment materials*

Adam Pilch

apilch@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Basilica of Divine Mercy in Krakow–Łagiewniki was consecrated in 2002, after three years of construction work. The author of the design is Witold Cęckiewicz. Cubature is about 43 000 m³ with more than 1800 seating places. The main dimensions of the interior are: length: 64 m, width: 43 m, and height 30 m. Most materials used inside the Basilica are flat and hard like marble, concrete, glass, wood, and steel. The only sound-absorbing materials are plastic chairs, a wooden pew, and an organ on the back wall. Reverberation time measured in the empty Basilica (without people) was above 8 seconds (T30mid). The calibrated acoustic model was used to simulate acoustic parameters for Basilica with people inside, which gave T30mid above 5.4 seconds. Different variants of acoustic treatment were proposed and results were analysed. The best solutions are under consultation with architects to find materials and constructions that will not disturb the character of the Basilica.

Semiwariancje w ocenie niepewności długookresowych wskaźników hałasu

Semivariances in the evaluation of uncertainty of long-term noise indicators

Bartosz Przysucha, Dariusz Majerek

b.przysucha@pollub.pl

Lublin University of Technology

Long-term noise indicators LD, LW, LN, LDWN are the basic tool used in environmental noise protection. They are calculated on the basis of measurements of daytime, evening and nighttime sound levels from the entire calendar year. In measurement practice, this approach from a technical and economic point of view is not implemented. Most often, these indicators are determined based on a measurement sample of several or more days. In this case, in addition to the estimated value of the indicator, it is necessary to provide the measurement uncertainty with which the indicators were determined. Classical constructions of uncertainty intervals use the asymptotic convergence of the distribution of the indicator mean or energy level mean to a normal distribution (CLT). However, measurement practice shows that probability distributions of long-term noise indicators and energy levels are often asymmetric. With small measurement samples of a few or a dozen or so elements, this makes it impossible to use classical constructions of uncertainty intervals. This is because the mean of such indices will be slow converging to a normal distribution and thus the uncertainty interval may not meet the condition of adequate coverage for the true value for small measurement samples. In such a case, there is a need for confidence intervals that take into account the asymmetry of the distribution. This paper presents the construction of an uncertainty interval based on semivariances that take into account the asymmetry of the distribution. Based on sound level measurements from monitoring of the City of Gdansk, a comparison of intervals constructed in this way with classically used intervals is presented. It is shown that confidence intervals based on semivariances give a better degree of coverage than classical intervals, which may be the basis for the introduction of confidence intervals based on semivariances as a tool for measuring the uncertainty of long-term noise indicators.

Analiza czasowych przesunięć progów słyszenia w wyniku ekspozycji na hałas ultradźwiękowy

Analysis of temporary threshold shifts in hearing after exposure to ultrasonic noise

Jan Radosz

jarad@ciop.pl

Central Institute for Labour Protection – National Research Institute

This study presents preliminary results of evaluating the impact of ultrasonic noise on the auditory system, utilizing the most commonly employed method – pure-tone audiometry (PTA) for determining hearing thresholds. The research aimed to investigate the temporary threshold shifts (TTS) resulting from exposure to ultrasonic noise. Hearing thresholds were measured before and after exposure, within the standard range of 1 to 8 kHz and the extended range of 9 to 16 kHz. Participants were exposed to two types of ultrasonic signals representing typical industrial sources – an ultrasonic cleaner and an ultrasonic welder. The analysis of results revealed statistically significant differences in hearing thresholds (both sides) for 8 kHz and 16 kHz after exposure to ultrasonic noise, regardless of the type of ultrasonic noise source. The average differences were 3.8 dB for 8 kHz and 5.8 dB for 16 kHz in the case of the ultrasonic cleaner, and 2 dB for 8 kHz and 3.5 dB for 16 kHz in the case of the ultrasonic welder. Despite smaller differences before and after exposure with the ultrasonic welder, the analysis did not show statistically significant differences regarding the influence of the type of noise source.

Analiza możliwości modyfikacji opóźnienia fazowego w komórkach metamateriałów akustycznych

Enhancing sound diffuser performance: a study on modification phase delay in acoustic metamaterial cells

Jarosław Rubacha

jrubacha@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

This article explores the use of acoustic metamaterial cells to construct sound diffusers. The aim of the research was to increase the phase delay change in metamaterial cells and reducing independent dimensions. Specifically, the study focused on metamaterial cells that consist of slits loaded with quarter-wave resonators (SL+QR) or Helmholtz resonators (SL+HR). The results have identified the cell dimensions with the most potential for modifying the phase delay and reduced the number of cell dimensions needed to optimize sound diffusers.

Badanie właściwości dźwiękochłonnych i izolacyjnych materiałów regenerowanych w celu ograniczenia hałasu

Study of sound-absorbing and insulating properties of regenerable materials to reduce noise

Patrycja Świrk, Lucyna Leniowska*, Edyta Prędką***

pswirk@ur.edu.pl

**University of Rzeszów, **Rzeszów University of Technology*

Sound-absorbing and insulation materials are widely used in room acoustic adaptations and in industry to reduce noise. Many available panels and sound-absorbing shields are made from reticulated foam, fibrous, granular, or loose materials compressed together, for example, under the influence of temperature, while maintaining a porous structure. However, most of them degrade under the influence of environmental conditions, temperature, humidity, etc. The aim of the research is to develop materials that are characterised by good insulation and absorption properties while also exhibiting high moisture resistance, and that are suitable for regeneration. The paper presents the results of research on acoustic parameters such as the absorption coefficient and transmission loss for selected materials composed of plastic granules. Several samples with regular shapes and different sizes of granules were tested. Promising results were obtained for both the sound absorption coefficient and the transmission loss of the developed samples. It was found that high humidity does not affect the acoustic properties of the considered samples and does not cause negative changes in the material structure.

Analiza kryteriów stosowanych w kwalifikacji źródeł hałasu impulsowego

Analysis of criteria used in the qualification of impulse noise sources

Tadeusz Wszolek

twszolek@agh.edu.pl

AGH University of Kraków

According to WHO (2018), the basis for assessing the health effects of noise exposure are the long-term indicators Lden and Ln. According to ISO 1996-2, when assessing noise annoyance, additional features should also be taken into account, such as impulsivity, tonality, increased levels in the low frequency range, and others. However, the classification of each additional feature is associated with uncertainty resulting from the lack of clear criteria for their classification, and on the other hand, the subjective nature of noise perception. This is especially noticeable and important in the case of impulse noise in the context of large corrections of 5–12 dB. The work shows the approaches used in the world and attempts to objectify the classification of high-impulse noise sources, on the other hand, the ambiguity of the arbitrary classification of such sources, and indicates measurable features helpful in the classification of these sources in terms of their actual annoyance. Using the example of wagon collision noise, it was shown that the most important features, apart from the SEL level, include the speed of sound rise, the LMAX level and the ratio of the LMAX level to the background level.

Streszczenia prac konkursowych

Zastosowanie algorytmów obliczania stopnia rozproszenia pola akustycznego na potrzeby akustyki małych pomieszczeń

Application of the sound field diffuseness level estimation algorithms for the small room acoustic purpose

Maria Brzóska, Bartłomiej Chojnacki

mbrzoska@student.agh.edu.pl

AGH University of Kraków

To enhance room acoustics, sound diffusers are commonly used. They allow for the mitigation of acoustic defects arising from strong reflections within a room while simultaneously minimizing the loss of acoustic energy. Various parameters have been developed to estimate the level of sound field diffuseness within the investigated interior. Small rooms, where wave phenomena and initial reflections play a crucial role, require a separate approach, as the algorithms employed thus far do not always yield reliable results. This study analyzes the accuracy of applying the described algorithms, such as echo – density profile, normalized kurtosis curve and DFF, along with adjustments for small spaces, to assess the effectiveness of sound diffuser within the room. The results of the research implementation was the development of guidelines for determining the degree of acoustic sound field diffusion to the needs of small room acoustics and the method for calculating a single value enabling the determination of the degree of sound field diffusion.

PoliTheremin – model numeryczny i budowa prototypu

PoliTheremin – numeric model and prototype construction

Miłosz Derżko, Paweł Pawlik

milder@student.agh.edu.pl

AGH University of Kraków

This paper is about a polyphonic instrument inspired by the workings of the Theremin called PoliTheremin. The basis of PoliTheremin's operation is reading the exact location of a musician's hand in space using machine learning methods. A two-dimensional numerical model of the electric field used to generate data on the capacitance obtained at multiple antennas of the instrument is discussed. The data obtained by the numerical model enables the training of a prototype neural network, which will then be applied to the final instrument. In addition, the model can be used to optimize the dimensions of the instrument, such as length, diameter, tilt angle and antenna spacing, which affects signal correlation and the efficiency of the trained neural network. The paper also presents the first version of the prototype equipped with proximity detectors and a microcontroller, which is responsible for reading and analyzing signals from each antenna of the instrument. These signals are further transmitted to a computer for comparison with the data generated by the numerical model. Verification of the numerical model was carried out using the prototype created.

Analiza parametrów akustycznych sal ćwiczeniowych w szkołach muzycznych

Acoustic parameters of practice room in music schools

Milena Faruga, Adam Pilch

faruga@student.agh.edu.pl

AGH University of Kraków

The aim of this dissertation is to analyze the acoustic conditions in rehearsal rooms in music school. The study contains results of objective acoustic parameters measurements, performed in 19 rehearsal rooms. It has been shown, that the acoustics in the measured rooms varies significantly, which is caused mainly by the number and placement of sound-absorbing materials. In order to verify which values of acoustic parameters suit musicians the most and whether existing requirements are sufficient to achieve comfortable conditions to practice in music school, a survey about the subjective feelings experienced by the students and teachers while playing in these rooms was also conducted. Based on the measurement results and the survey it was found out that the requirements, in particular regarding the reverberation time, are not sufficient for rehearsal rooms. As a part of this dissertation, a model of one of the rooms was created using CATT-Acoustic and its acoustic treatment was carried out in order to obtain values of reverberation time closer to values desired by participants of the survey.

Modelowanie numeryczne podstawowych komórek metamateriałów dźwiękochłonnych o dowolnej geometrii wewnętrznej

Numerical modeling of basic cells of sound-absorptive metamaterials with any internal geometry

Piotr Książek, Bartłomiej Chojnacki

pioksziazek@student.agh.edu.pl

AGH University of Kraków

This paper concerns a method of modelling sound-absorptive metamaterials using the final element method modelling. The developed method allows for calculating the sound absorption coefficient of two-dimensional metamaterial cells with arbitrary internal geometry. Numerical calculations in such models need to consider thermoviscous effects, which in trivial geometries may be approximated with effective fluid parameters. This is not possible however in the case of arbitrary geometry. In such cases, nonlinear acoustic equations need to be solved within the final element model, which requires an exceptionally fine mesh to accurately represent fluid boundary layer effects. The method's performance was evaluated on 20 randomly generated geometries. The impact of geometry parameters on sound absorption coefficient calculated by the developed method was discussed. Mesh stability and mesh density on calculation results and computation time was discussed in depth as well. The developed method allows for accurate and time-effective modelling of metamaterial cells with arbitrary geometry, which may become useful in future work with topological optimization of acoustic metamaterials.

Identyfikacja błędów w cyfrowych torach transmisji stacji radiowych – podejście w dziedzinie częstotliwości

Errors Identification in digital transmission paths of radio stations – frequency domain approach

Marcin Pater, Marcin A. Grochowina

mpater@ur.edu.pl

University of Rzeszów

Radio stations operating with analog modulation send signals to transmitters via hybrid radio links. The signal is sent in digital form from the studio to the transmitter. There are interferences in the radio lines that are analyzed in this article. In the studies carried out so far, signal analysis in the time domain was used to identify the occurrence of interference. Statistical parameters were calculated that allowed the identification of certain types of interference occurring in the transmitted signal. In order to identify disturbances that are difficult to identify through time-domain analysis, the approach was changed and investigate the phenomenon in the frequency domain. For this purpose, the short-time Fourier transform (sFFT) was used, and a vector of features carrying information about the occurrence of disturbances was calculated. The effect of recognizing places of interference using several types of classifiers was compared. Environments related to the radio signal broadcasting and transmission industry are interested in analyzing this phenomenon, because there are currently no commercial solutions on the market that allow automatic detection and identification of this type of problems.

Analiza wpływu zastosowanych metod wibroizolacji gramofonu typu lekkiego na pomiary przyspieszeń drgań

Analysis of the effect of applied vibration isolation methods for a lightweight turntable on vibration acceleration measurements

Aleksandra Sawczuk, Bartłomiej Chojnacki

asawczuk@student.agh.edu.pl

AGH University of Kraków

Measures to reduce the generation and transmission of vibrations between the source and the surroundings are referred to as vibration isolation. Its application is particularly important for delicate systems where even the slightest shocks are undesirable. Vibration reduction is most commonly achieved by lowering the resonant frequency of the system by increasing its mass. However, this solution is not feasible for delicate devices, such as turntables, weighing no more than 10 kg. In order to reduce additional vibrations at the contact between the needle and the record, it would be necessary to isolate the system from the base, which can be achieved using vibration isolation, for example, in the form of a platform. This paper will present a vibroacoustic analysis of the turntable – the influence of applied vibration isolation methods on vibration acceleration measurements. There will be a comparison of the investigated measurement methods and vibroacoustic excitation in different environments. The applied vibration isolation materials and their impact on the effectiveness of vibration reduction will also be discussed.

Prace konkursowe

Zastosowanie algorytmów obliczania stopnia rozproszenia pola akustycznego na potrzeby akustyki małych pomieszczeń

Maria Brzóska, Bartłomiej Chojnacki

mbrzoska@student.agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Abstract Rozpraszające ustroje akustyczne umożliwiają niwelację wad akustycznych w pomieszczeniu wynikających z istnienia silnych odbić przy jednoczesnej minimalizacji utraty energii akustycznej. Dotychczas opracowano parametry pozwalające na ocenę stopnia rozproszenia pola w dużych pomieszczeniach. Wnętrza o małych objętościach, gdzie dominują zjawiska falowe i pierwsze odbicia odgrywają kluczową rolę, wymagają odrębnego podejścia. W pracy przeanalizowano zasadność zastosowania algorytmów, takich jak krzywa echo – density, krzywa znormalizowanej kurtozy oraz wskaźnik rozproszenia pola DFF wraz z poprawkami dla małych pomieszczeń do oceny stopnia rozproszenia pola. Rezultatem pracy było opracowanie wytycznych umożliwiających wykorzystanie wymienionych wyżej algorytmów na potrzeby akustyki małych pomieszczeń oraz sposobu wyliczania wartości jednoznacznej, określającej stopień rozproszenia pola.

1. Wprowadzenie

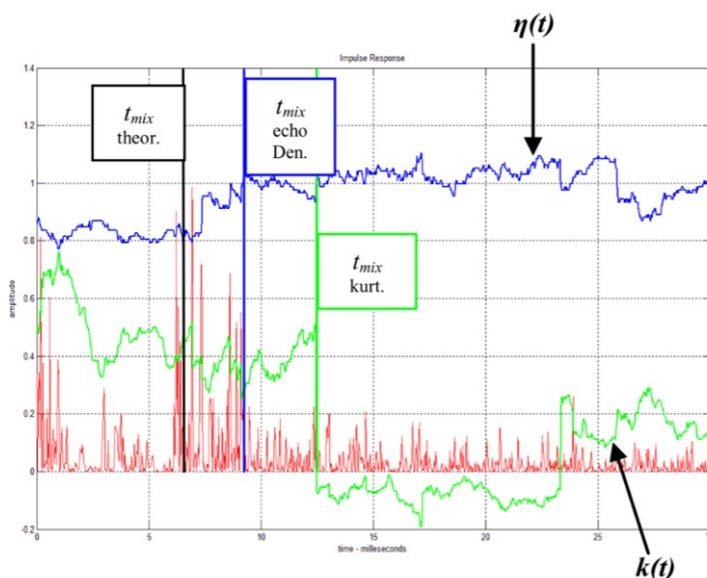
W polu idealnie rozproszonym do każdego punktu pomieszczenia docierają fale o przypadkowych fazach i jednakowych mocach z kierunków równomiernie rozłożonych w pełnym kącie brylowym wokół tego punktu [1], jednak w warunkach rzeczywistych uzyskanie pola idealnie rozproszonego jest niemal niemożliwe [2]. Parametry statystyczne umożliwiają ocenę odchyłeń od zakładanych rozkładów, którym w przypadku pola rozproszonego jest rozkład Gaussa.

W literaturze zaproponowano szereg parametrów umożliwiających obiektywną ocenę stopnia rozproszenia pola akustycznego na podstawie statystycznej analizy właściwości zarejestrowanej odpowiedzi impulsowej, korzystając z podstawowych wielkości statystycznych, takich jak kurtoza [3], czy odchylenie standardowe [4].

Opracowane dotychczas parametry tyczą się pomieszczeń o dużych rozmiarach, takich jak sale koncertowe. Do nagrywania, miksowania, czy produkowania muzyki powszechnie wykorzystuje się wnętrza o małych kubaturach, w których ze względu na dominujące zjawiska falowe, panują odmienne warunki akustyczne. Do oceny stopnia rozproszenia pola akustycznego w akustyce małych pomieszczeń (AMP) konieczne jest zmodyfikowanie i zastosowanie odpowiednich poprawek do dotychczas opracowanych parametrów. Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania algorytmów zaproponowanych w literaturze do oceny stopnia rozproszenia pola małych pomieszczeń. Dla wybranych metod wyznaczono poprawki umożliwiające dostosowanie ich do specyfiki AMP. W niniejszej pracy zaprezentowano badania weryfikujące wraz z oceną stopnia rozproszenia pola akustycznego w przykładowym małym pomieszczeniu.

2. Analizowane parametry do oceny stopnia rozproszenia pola akustycznego

W pracy przeanalizowano zaproponowane w literaturze parametry takie jak krzywa echo – denisty [4], krzywa znormalizowanej kurtozy [3] oraz wskaźnik rozproszenia pola DFF [5]. Algorytm wyznaczania krzywych obejmuje okienkowanie zarejestrowanych odpowiedzi impulsowych z wykorzystaniem okna czasowego z krokiem co jedną próbkę oraz wyliczanie wartości parametru wewnątrz analizowanego okna. Algorytm krzywej echo – denisty wykorzystuje odchylenie standardowe, natomiast krzywa znormalizowanej kurtozy – znormalizowaną kurtozę. Za wartość jednoczłobową mówiącą o stopniu rozproszenia pola, autorzy algorytmów przyjęli pierwszy czas, w którym krzywa przyjmie wartość spodziewaną dla rozkładu normalnego – 1 w przypadku krzywej echo – denisty, oraz 0 w przypadku krzywej znormalizowanej kurtozy (Rys. 1).



Rysunek 1: Krzywa echo – density $\eta(t)$ oraz krzywa znormalizowanej kurtozy $k(t)$

Współczynnik rozproszenia pola DFF definiuje odchylenie standardowe czasu pogłosu w przestrzeni. Gdy uzyskane wartości są zbliżone do jedności, rozkład czas pogłosu na analizowanej przestrzeni jest równomierny, co jest jednym z warunków klasyfikacji pola jako rozproszone.

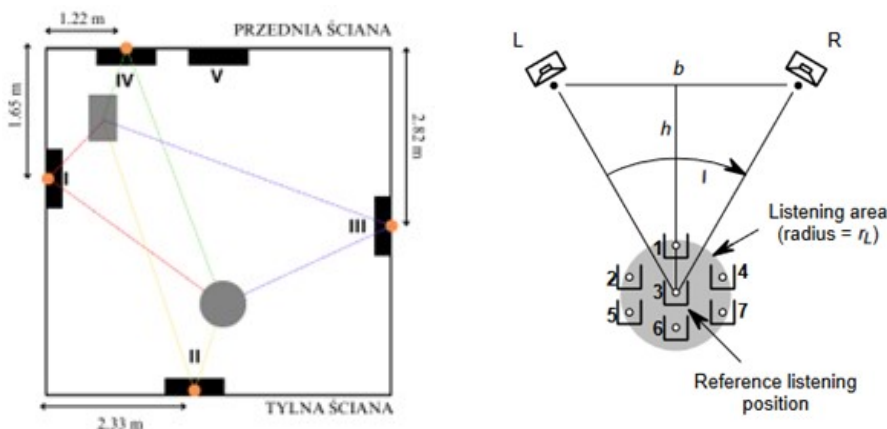
Uniwersalność zastosowania opisanych parametrów nie została dokładnie przebadana. Autorzy algorytmów optymalną długość okna analizy zdefiniowali jako 20 – 30 ms, co w przypadku pomieszczeń o niewielkich rozmiarach może skutkować uzyskaniem niedokładnych wyników. Kolejnym aspektem jest dobór wskaźnika jednoczłobowego – w związku z wahaniami wartości krzywej wokół wartości spodzie-

wanych dla rozkładu normalnego, kryterium doboru na podstawie pierwszego momentu, gdy wartość spodziewana zostaje osiągnięta może skutkować błędną analizą stopnia rozproszenia pola.

W celu dostosowania algorytmów do warunków panujących w pomieszczeniach o małych rozmiarach, przyjęto następujące poprawki. Długość okna analizy dobrano na podstawie średniej drogi swobodnej w pomieszczeniu [6]. Dzięki temu, zapewniono występowanie co najmniej kilku odbić wewnątrz analizowanego okna. Przefiltrowano zarejestrowane odpowiedzi impulsowe do zakresu działania rozpraszacza, w celu pominięcia wpływu zjawisk falowych na postać krzywej oraz ograniczenia analizy jedynie do zjawiska rozpraszania dźwięku. Za wskaźnik jednoczłonowy przyjęto średnią wartość z przedziału od 2 ms odpowiedzi impulsowej do pierwszego momentu osiągnięcia przez krzywą wartości spodziewanej dla rozkładu normalnego.

3. Przeprowadzone badania

Do weryfikacji zaproponowanych algorytmów przeanalizowano małe pomieszczenie o wymiarach $5,46\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$. Zgodnie z zaleceniami [7], wyznaczono pięć punktów pomiarowych na obszarze okręgu (Rys. 2a). W celu analizy słusności stosowania opisanych algorytmów wyznaczono jedną lokalizację źródła dźwięku wszechkierunkowego. Do badań wykorzystano dyfuzor akustyczny 2D o znanych parametrach. Zarejestrowano odpowiedź impulsową pustego pomieszczenia, traktowaną jako wariant kontrolny. Następnie dokładano rozpraszacze dźwięku w punktach pierwszych odbić, stopniowo zwiększając liczbę powierzchni rozpraszających. Od jednego dyfuzora w punkcie III (rysunek) – wariant 1, do czterech w punktach I,II,III,IV – wariant 4. Zarejestrowano odpowiedź impulsową pustego pomieszczenia, traktowaną jako wariant kontrolny (Rys. 2a).

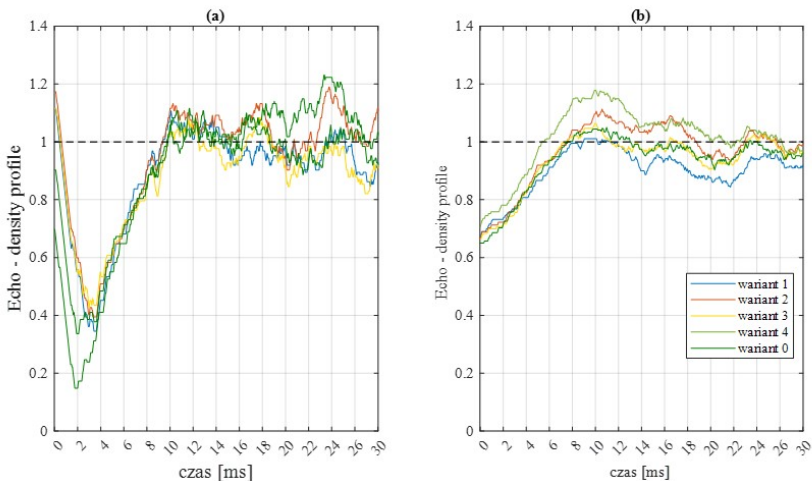


Rysunek 2: Wizualizacja sytuacji pomiarowej w analizowanym wnętrzu (a). Zalecany układ odsłuchu muzyki stereofonicznej (b)

4. Weryfikacja parametrów akustycznych do oceny stopnia rozproszenia pola

Pierwszym etapem pracy było zaimplementowanie algorytmów krzywych bez poprawek dla małych pomieszczeń, w celu zweryfikowania konieczności ich stosowania.

Zastosowanie okna, o długości zaproponowanej przez autorów algorytmów oraz pominięcie kroku filtracji odpowiedzi impulsowej do zakresu działania rozpraszacza (Rys. 3) uniemożliwia ocenę stopnia rozproszenia pola w przypadku małych pomieszczeń. W obydwu przypadkach różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami są nieznaczne. Może być to wynikiem nie zapewnienia wystarczającej liczby odbić wewnątrz analizowanego okna oraz wpływem zjawisk falowych dominujących w małych pomieszczeniach na otrzymane wyniki.

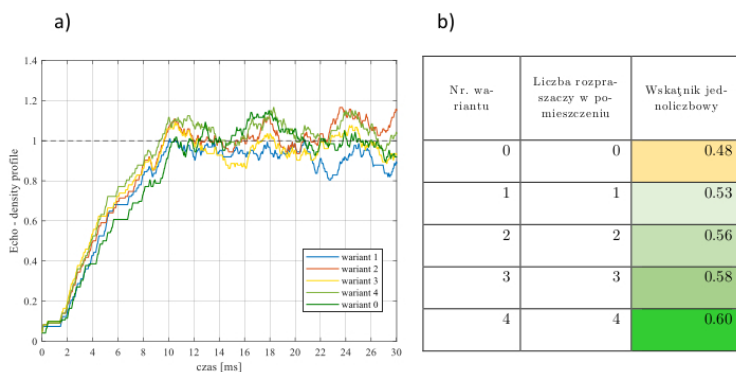


Rysunek 3: Wartość krzywej echo – density profile po braku przefiltrowania sygnału do zakresu działania rozpraszacza i z zastosowaniem okna o długości 8 ms (a). Wartość krzywej echo – density po przefiltrowaniu sygnału do zakresu działania rozpraszacza i z zastosowaniem okna o długości 20 ms

Po wprowadzeniu poprawek do małych pomieszczeń uzyskano następujące wyniki (Rys. 4).

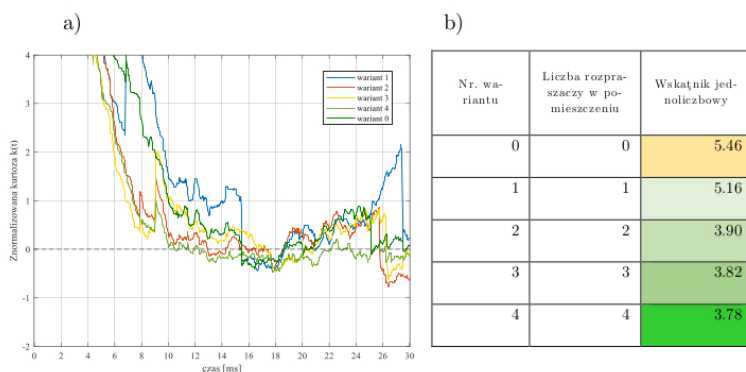
Po implementacji algorytmów otrzymano krzywe zbliżone do uzyskanych przez autorów algorytmów. Wartość 1 zaznaczona poziomą przerywaną linią na Rys. 4a odnosi się do wartości spodziewanej dla rozkładu normalnego. Z analizy wykresu wynika, iż wraz ze wzrostem liczby rozpraszaczy w pomieszczeniu (od zera – wariant 0, do czterech – wariant 4) wartości krzywej echo – density coraz szybciej zbliżają się do jedności. Wyliczone wskaźniki jednoczłowe przedstawione na rysunku

4b również przyjmują coraz wyższe wartości wraz ze wzrostem liczby rozpraszaczy w pomieszczeniu, co świadczy o coraz większym stopniu rozproszenia pola.



Rysunek 4: Wykres krzywej echo – density po przefiltrowaniu zakresu działania rozpraszacza i zastosowaniu okna o długości 8 ms (a). Zestawienie wskaźników jednoczłonowych dla pomieszczenia z różną liczbą rozpraszaczy (b)

Krzywa znormalizowanej kurtozy po zastosowaniu poprawek dla małych pomieszczeń, również przyjęła postać zbliżoną do uzyskanej przez autorów algorytmu. Wartość oznaczająca czas przejścia do pola rozproszone w przypadku krzywej znormalizowanej kurtozy wynosi 0 i na wykresie została oznaczona linią przerywaną (Rys. 5a). Jak wynika z analizy wykresu wartości krzywej znormalizowanej kurtozy są niższe dla wariantów z większą liczbą rozpraszaczy. Obliczone wskaźniki jednoczłonowe, przedstawione na rysunku 4b również maleją wraz ze wzrostem liczby rozpraszaczy w pomieszczeniu, co świadczy o wyższym stopniu rozproszenia pola.



Rysunek 5: Wykres krzywej znormalizowanej kurtozy po przefiltrowaniu do zakresu działania rozpraszacza i zastosowaniu okna o długości 8 ms (a). Zestawienie wskaźników jednoczłonowych dla pomieszczenia z różną liczbą rozpraszaczy (b)

Analiza wartości wskaźnika rozproszenia pola DFF w zakresie działania rozpraszania (630 – 10 000 Hz), wykazała, że wariant z największą liczbą rozpraszaczy przyjmuje wartości najbliższe jedności, co świadczy o wyższym stopniu równomierności pokrycia przestrzeni czasem pogłosu, jednak nie określa bezpośrednio stopnia rozproszenia pola akustycznego.

5. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano zaproponowane w literaturze algorytmy do oceny stopnia rozproszenia pola, takie jak krzywa echo – denisty, krzywa znormalizowanej kurtozy oraz współczynnik rozproszenia pola DFF. Zweryfikowano słuszność doboru okna analizy na podstawie średniej drogi swobodnej w analizowanym wnętrzu oraz stwierdzono konieczność filtracji zarejestrowanej odpowiedzi impulsowej do zakresu działania rozpraszacza. Zaproponowany w pracy sposób wyznaczania wskaźników jednoliczbowych umożliwia ocenę stopnia rozproszenia pola w przypadku zastosowania źródła wszechkierunkowego. Potwierdzono skuteczność wykorzystywania parametru krzywej echo – denisty oraz znormalizowanej kurtozy do oceny stopnia rozproszenia pola, natomiast wskaźnik rozproszenia pola DFF sklasyfikowano jako parametr uzupełniający wyżej wymienione krzywe.

Bibliografia

- [1] A. Kulowski, *Akustyka Sal Zalecenia projektowe dla Architektów*, Wydanie II. Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011.
- [2] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 4th ed. 1991.
- [3] R. Stewart, M. Sandler, *Statistical measures of early reflections of rooms impulse responses*, Proc. Of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx – 07), Bordeaux, Francja, 2007.
- [4] J.S. Abel, P. Huang, *A Simple, Robust Measure of Reverberation Echo Density*, Audio Engineering Society Convention Paper 6985, San Francisco, USA, 2006.
- [5] J.L. Davy, *The variance of decay rates at Low Frequencies*, Applied Acoustics, 23, 1987.
- [6] L. Rizzi, G. Ghelfi, *Scattering effects in small rooms: from time and frequency analysis to psychoacoustic investigation*, Audio Engineering Society Convention Paper 8862, Rzym, Włochy, Maj 2013.
- [7] EBU Tech3276, *Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic*, 1998.

PoliTheremin – model numeryczny i budowa prototypu

Miłosz Derżko, Paweł Pawlik

milder@student.agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Abstract Niniejsza praca dotyczy polifonicznego instrumentu inspirowanego działaniem Theremina o nazwie PoliTheremin. Podstawą jego działania jest odczyt dokładnego umiejscowienia dłoni muzyka w przestrzeni przy użyciu metod uczenia maszynowego. Omówiony został dwuwymiarowy model numeryczny pola elektrycznego służący do generacji danych dotyczących pojemności uzyskiwanej na wielu antenach instrumentu. Dane uzyskane przez model numeryczny umożliwiają trening prototypowej sieci neuronowej, która następnie zostanie zastosowana w finalnym instrumencie. Dodatkowo model ten może zostać użyty do optymalizacji wymiarów urządzenia, takich jak długość, średnica, kąt nachylenia i rozstaw anten, co wpływa na korelację sygnałów oraz efektywność trenowanej sieci neuronowej.

1. Wstęp

PoliTheremin jest instrumentem którego działanie bazuje na konstrukcji detektorów odległości [1]. Podobnie jak w Thereminie odległość zostaje odczytywana na podstawie zmian częstotliwości generatora przestrajalnego. Zbliżenie ręki do anteny powoduje zwiększenie pojemności anteny, co w efekcie przestrajają obwód generatora [2]. Zmiany wynikające z ruchu ręki wpływają na częstotliwość wyjściową instrumentu, co powoduje, że można na nim grać. Sytuacja jest prosta, gdy antena jest jedna. Gdy jest ich więcej, ruch jednego palca może wpływać na pozostałe częstotliwości. Wynika to z faktu, że antena posiada charakterystykę dookólną [3]. Aby skutecznie uniezależnić sygnały pochodzące z anten, można zastosować sieć neuronową. Jest ona zdolna do nauki reprezentacji danych poprzez wykrywanie i ekstrakcję istotnych cech. Dzięki temu sieć może wyodrębnić informacje istotne dla rozróżnienia różnych sygnałów, nawet w przypadku skorelowanych wartości. Potrzebuje ona jednak bazy danych, na której będzie przeprowadzać trening.

2. Wygenerowanie danych treningowych

PoliTheremin jest instrumentem, który dopiero powstaje, w związku z tym nie istnieją dane dostępne w bazie literatury. Zebranie odpowiedniej bazy treningowej jest kluczem do stworzenia optymalnej sieci neuronowej. Należy więc zwrócić szczególną uwagę przy jej generowaniu. Wejściem sieci neuronowej będą częstotliwości wygenerowane przez detektory zbliżenia. Wyjściem natomiast będą cztery odległości między anteną a odpowiednim palcem muzyka.

Bazę danych można pozyskać na różne sposoby. Jednym z nich jest symulacja pola elektrycznego w przestrzeni między anteną i ręką. Pozwoli ona obliczyć pojem-

ność każdej z anten. Pojemności te z kolei pozwolą policzyć częstotliwość użytego generatora przestrajanego.

Ten sposób pozwala na wygenerowanie wartości wejściowych urządzenia dla konkretnych położeń ręki. Trzeba mieć jednak na uwadze fakt, że droga jaką należy przejść do uzyskania częstotliwości generatora z danej geometrii, przechodzi przez szereg uproszczeń. Mogą one mieć istotny wpływ na ostateczny wynik. Konieczne będzie więc dostrojenie modelu. Aby to zrobić, zostaną zbudowane detektory odległości razem z antenami.

Drugim ze sposobów pozyskania danych treningowych jest zastosowanie zbudowanego prototypu do utworzenia zbioru treningowego. Należałoby w tym przypadku stworzyć usztywnienie badanej ręki które będzie obojętne elektrycznie. Dodatkowo pojawia się problem niepewności pomiaru odległości dla palców osoby biorącej udział w zbieraniu danych.

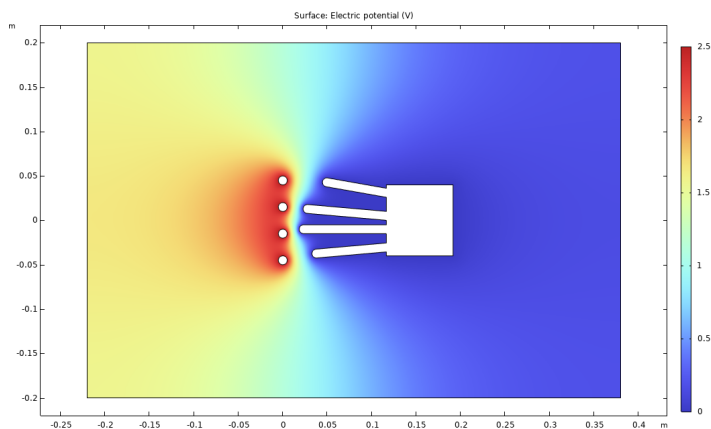
3. Model fizyczny

Symulacja pola elektrycznego została przeprowadzona w oprogramowaniu COMSOL multiphysics. Zbudowany model powinien odwzorować rzeczywiste zmiany pola elektrycznego zachodzące w pobliżu anten detektorów położenia. Wykorzystano tutaj geometrię na płaszczyźnie 2D. Zawiera ona wcześniej wymienione anteny oraz uproszczoną geometrię dłoni z czterema palcami. Do jej narysowania wykorzystano dłoń referencyjną, aby wymiary były wiarygodne. Kształt został uproszczony do kilku prostokątów, aby nie było problemu z parametryzacją wymiarów. Ruchy kurczące palców zostały zastąpione ich przesunięciem, dzięki temu można było policzyć zmiany pola elektrycznego w zależności od przyjętych długości palców.

Aby wyliczyć pojemność antena-dłoń należy wyznaczyć rozkład potencjału elektrycznego oraz ładunku na powierzchni dookoła przewodników. Symulacja zawiera się w powierzchni prostokątnej o wymiarach 600mm na 400mm o właściwościach elektrycznych powietrza. Krawędziom dłoni nadany został potencjał masy, natomiast anteny posiadają potencjał równy 2,5V. Zastosowana została siatka trójkątna z elementami o wymiarach od 1mm do 40mm. Symulacja jednego położenia palców wykonuje się w czasie poniżej 20 sekund. Rys. 1 przedstawia rozkład potencjału elektrycznego dla przyjętego ustawienia palców.

Jak widać na Rys. 1, rozkład pola elektrycznego ma charakter gradientowy, co jest zgodne z oczekiwaniami. Dla przypadku pokazanego na Rys. 1, odległości dla każdego z palców oraz pojemności są dane w Tab. 1.

Policzone pojemności mają wartość rzędu kilkudziesięciu pikofaradów, więc podobnie jak w klasycznym thereminie. Wynik powinien przejść proces walidacji za pomocą prawdziwego układu elektronicznego. Prototyp instrumentu będzie generował częstotliwość związaną z odległością. Trzeba będzie więc przeliczyć każdą wartość pojemności na odpowiadającą jej częstości. Jednak aby to zrobić, należy zaprojektować układ detektora.



Rysunek 1: Obliczony rozkład potencjału elektrycznego

Tabela 1: Obliczone pojemności dla przykładowych odległości palców

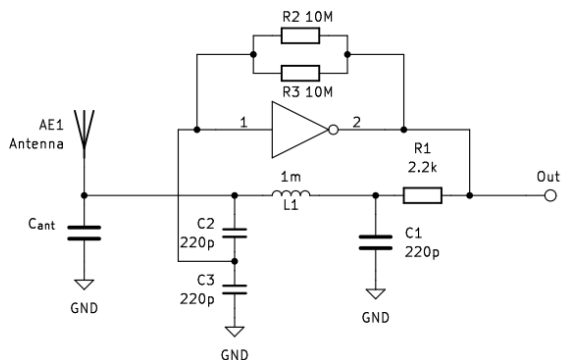
Palec	Odległość [mm]	Pojemność [μF]
Wskazujący	28.58	28.92
Środkowy	14.03	32.26
Serdeczny	17.93	29.06
Mały	39.67	26.75

4. Detektor zbliżenia

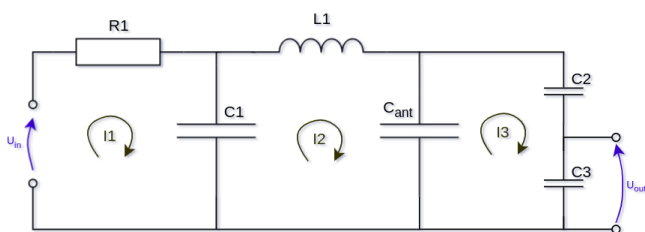
Najważniejszym elementem PoliThereminu od strony elektronicznej jest detektor odległości. Moduł ten wykrywa dystans między palcem a anteną. Składa się on z generatora przestrajanego oraz generatora referencyjnego. Obydwa generują częstotliwości rzędu 600kHz. Zmiany częstotliwości wynikające z ruchu ręki mają wartość, rzędu pojedynczych kiloherców. Aby go zwiększyć, można zastosować układ próbujący. Dzięki niemu, pasmo wejściowego sygnału zostanie odbite do małych częstotliwości dla których takie zmiany będą bardziej zauważalne. Generator przestrajany najczęściej projektuje się na podstawie układu samowzbuźnego z pojemnościowym sprzężeniem zwrotnym. Tak też tutaj, zaproponowana konstrukcja detektora bazująca na projekcie OpenTheremin [4] zawiera sprzężenie nie tylko pojemnościowe. Generator przestrajany zbudowany jest na negatorze z układem rezonansowym RLC . Schemat generatora przestrajanego widnieje na Rys. 2.

Częstotliwość rezonansowa obwodu rezonansowego zależy przede wszystkim od wartości elementów $R1$, $C1$, $L1$, $C2$, $C3$. Oczywiście wszystkie te elementy mają stałą wartość, z wyjątkiem Kondensatora C_{ant} reprezentującego pojemność wykorzystanej anteny. Aby można było wyznaczyć częstotliwość generatora, należy dokonać analizy obwodu sprzężenia zwrotnego. Wykorzystano tutaj metodę prą-

dów oczkowych w domenie Laplace'a [5]. Obwód rezonansowy posiada takie trzy, na Rys. 3 można zobaczyć ich rozmieszczenie.



Rysunek 2: Analizowany generator przestrajany



Rysunek 3: Oczka prądowe układu rezonansowego

Tak przedstawiony obwód można opisać układem trzech równań które tworzone są za pomocą II prawa Kirchhoff'a. Dodatkowo wykorzystano transformację Laplace'a ułatwić zapis funkcji różniczkowych. Równanie macierzowe opisujące obwód przedstawia się następująco

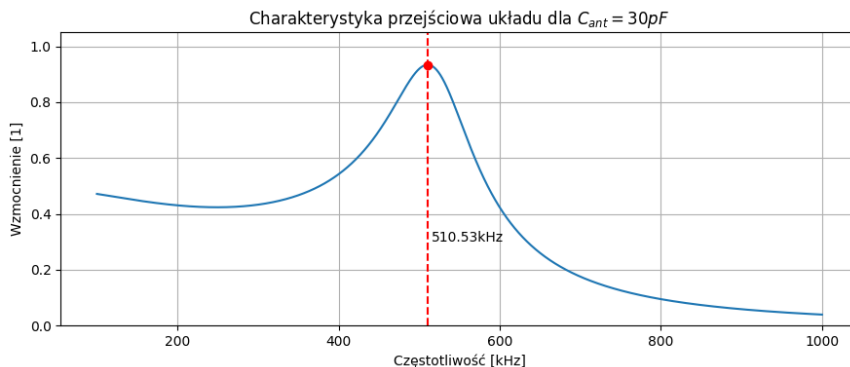
$$\begin{bmatrix} R1 + \frac{1}{C1s} & -\frac{1}{C1s} & 0 \\ -\frac{1}{C1s} & \frac{1}{C1s} + Ls + \frac{1}{C_{ant}s} & -\frac{1}{C_{ant}s} \\ 0 & -\frac{1}{C_{ant}s} & \frac{1}{C_{ant}s} + \frac{1}{C2s} + \frac{1}{C3s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Takie równanie można rozwiązać, korzystając z macierzy odwrotnej. Implementacja tej metody w programie komputerowym jest łatwa do zapisania i pozwala uzyskać wyniki podobne do obliczeń analitycznych. Rozwiązaniem równania są prądy $I1$, $I2$ oraz $I3$. Zatem wartość napięcia wyjściowego w domenie s jest dana wzorem

$$U_{out} = \frac{I3}{C3s} \quad (2)$$

Do wyznaczenia charakterystyki przejściowej obwodu należało przeprowadzić przedstawiony tok obliczeń dla wielu punktów częstotliwości. Następnie obliczyć

stosunek napięć $\frac{U_{out}}{U_{in}}$, aby w końcu wyznaczyć punkt w odpowiednim miejscu wykresu. Do przeprowadzenia tej operacji posłużono się odpowiednim skryptem w języku Python. Napięcie U_{in} użyte do analizy obwodu wynosiło jeden volt. Policzona charakterystyka układu została przedstawiona na Rys. 4.



Rysunek 4: Charakterystyka układu dla przykładowej pojemności anteny

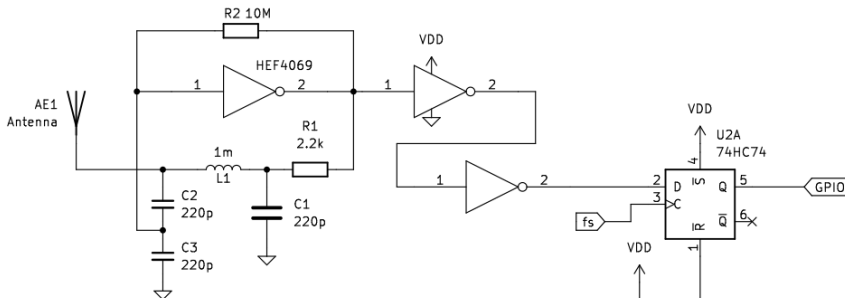
Można na nim zauważyć charakterystyczny rezonans dla częstotliwości około 500kHz co zostało również zaznaczone czerwoną przerywaną linią. Będzie to częstotliwość sygnału wyjściowego detektora odległości. Należy jednak pamiętać, że sygnał ten przechodzi przez układ próbkujący który odbija tę częstotliwość do niższych rzędów co zostało opisane w rozdziale 5.

5. Prototyp

Odbiegając od tematu elektroniki, prototyp zaczęto od przygotowania środowiska oraz kodu dla mikrokontrolera. W fazie testowej jego głównym zadaniem jest pomiar częstotliwości na czterech kanałach, a następnie przesłanie wartości do komputera. O ile przesył danych jest stosunkowo prosty – można wykorzystać do tego interfejs szeregowy UART. To pomiar częstotliwości jest już bardziej wymagającym zadaniem. Mikrokontroler rp2040 użyty w projekcie zawiera osiem sprzętowych liczników które będą niezbędne do pomiaru. Wykorzystano je do zliczania impulsów dla każdego okresu sygnału. Za pomocą przerwania wywołanego z boczem, resetowano licznik, uprzednio zapisując jego wartość. Jest ona ściśle związana z częstotliwością, co będzie niezbędne w zbieraniu danych. Dodatkowy timer został również użyty do wygenerowania sygnału próbkującego, ograniczyło to liczbę komponentów potrzebnych do budowy prototypu. Pozostałe elementy potrzebne do budowy zostały przedstawione na Rys. 5.

Można tutaj zauważyć generator przestrajany, którego wyjście jest poprowadzone do buforów sygnału. Na końcu wygenerowany sygnał trafia do przerzutnika typu D. Jest on taktowany sygnałem f_s wygenerowanym przez rp2040. Sygnał wyj-

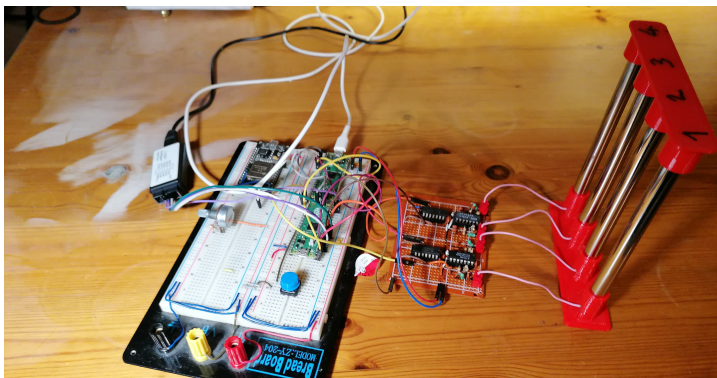
ściowy *GPIO* trafia na port mikrokontrolera, który następnie mierzy częstotliwość sygnału.



Rysunek 5: Schemat jednego kanału detektora zbliżenia

Budowa detektorów odległości została przeprowadzona na płytce prototypowej. Ponieważ mamy tutaj do czynienia z sygnałami stosunkowo wysokiej częstotliwości, należy pamiętać o odpowiednim odsprzęgnięciu układów.

Zasilanie pochodzi z płytki rozwojowej Raspberry Pi Pico o napięciu 3,3V. Płytkę prototypową zawiera wiele pól lutowniczych, co niekorzystnie wpływa na działanie prototypu. Zeszlifowano więc część niepotrzebnych pól wokół złącza na anteny, aby nie sprzęgały się z resztą układu. Anteny zostały wykonane z 15cm kawałków rur chromowanych o średnicy 1cm. Zostało również wydrukowane mocowanie pozwalające na utrzymanie rur w odpowiednich odstępach. Wykonany prototyp widnieje na Rys. 6.



Rysunek 6: Zbudowany prototyp instrumentu

Po zbudowaniu układu zmierzono częstotliwości generatorów przestrajanych. Częstotliwość próbkowania układu podczas pomiarów wynosiła 600kHz. Przeanalizowano dwa warianty. Pierwszy – bez podłączonych anten oraz drugi – z nimi. Wyniki pomiarów mieszczą się w Tab. 2.

Tabela 2: Częstotliwości generatorów przestrajanych dla dwóch wariantów

Kanał	Wariant 1 [kHz]	Wariant 2 [kHz]
1	633.9	625.1
2	639.0	627.2
3	624.0	618.9
4	623.1	614.2

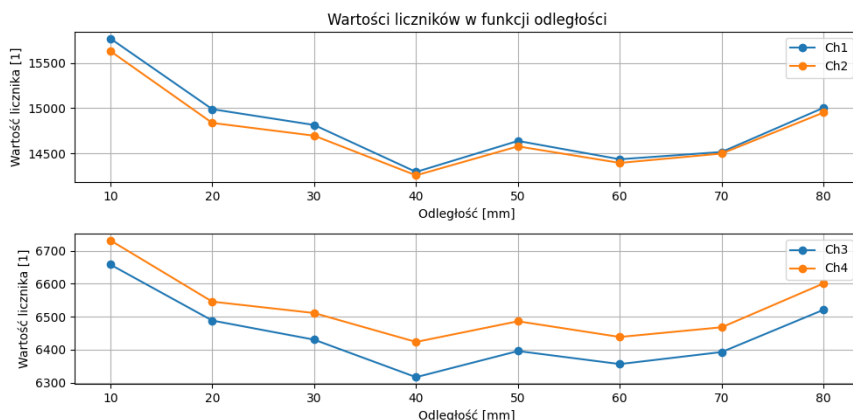
Wstępne wyniki pomiarów pokazują, że częstotliwości nawet dla odłączonych anten w najlepszej konfiguracji różnią się od siebie o ponad 10kHz. W przypadku użycia jednej częstotliwości próbkowania dla wszystkich generatorów powstaną przesunięcia częstotliwości, które mogą źle wpłynąć na docelowy projekt. Aby temu zapobiec, należy użyć osobnej częstotliwości próbkowania dla każdego kanału. Wymaga to użycia czterech liczników, które są ostatnimi dostępnymi w użytym mikrokontrolerze. Ponadto należy również zastosować mechanizm kalibracji podczas uruchomienia urządzenia. Nie tylko poprawi jakość sygnałów, ale też znieczuli układ na degradację właściwości komponentów z których został wykonany.

6. Porównanie wyników

Jednym z głównych celów budowy detektorów odległości jest porównanie wyników z modelem numerycznym. W tym celu dokonano akwizycji danych z urządzenia dla ośmiu położeń ręki. Dłoń była ułożona w taki sposób, aby wszystkie cztery odległości między antenami a palcami były takie same. Każdy pomiar na urządzeniu trwał pięć sekund, a częstotliwość przesyłania danych do komputera wynosiła 2kHz. Przed rozpoczęciem pomiarów dokonano zgrubnej kalibracji częstotliwości próbkowania w taki sposób, aby sygnały wyjściowe były najbardziej czułe na zmiany odległości. Skalibrowana płytka generowała $f_s = 609.6\text{kHz}$. Jako wartość przystającą do położenia ręki uznano wartość średnią. Wizualizacja wyników pomiarów przedstawia Rys. 7.

Można od razu zauważyć, że do około czterech centymetrów wartość funkcji maleje wraz z odległością, aby następnie zacząć rosnąć. Jest to prawdopodobnie spowodowane zakłóceniami powstałymi przez pojemności pasożytnicze płytki oraz stosunkowo bliską odległość między antenami. Dodatkowo można zauważyć, że wykresy w dużym stopniu się ze sobą pokrywają. Jest to prawidłowe zachowanie, ponieważ mierzone odległości mają podobną charakterystykę.

Kluczem do walidacji modelu jest porównanie wyników, zebrano więc również wygenerowane wartości liczników dla tych samych położeń ręki. Następnie policzono współczynniki korelacji oraz ich wartości p między wartościami zmierzonymi a policzonymi z modelu. Dla porównania policzono dwa współczynniki korelacji – Pearsona oraz Spearmana. Analizy dokonano na poziomie istotności $\alpha = 0.05$. Wyniki można zobaczyć w Tab. 3.



Rysunek 7: Wizualizacja zmian wartości liczników w funkcji odległości

Tabela 3: Tabela współczynników korelacji oraz wartości p dla poszczególnych kanałów

Kanał	Pearson		Spearman	
	r	p-val	ρ	p-val
1	0.68	0.06	0.29	0.49
2	0.86	0.01	0.33	0.42
3	0.81	0.02	0.33	0.42
4	0.29	0.48	0.29	0.49

Na podstawie współczynnika korelacji Spearmana należy wnioskować, że wartości rzeczywiste urządzenia, nie są skorelowane z modelem numerycznym. Biorąc jednak pod uwagę wartość p korelacji Pearsona, można stwierdzić, że korelacja modelu numerycznego dla kanału drugiego oraz trzeciego jest istotna statystycznie. Niestety jest to zbyt mało, żeby stwierdzić, że model przystaje do danych rzeczywistych.

7. Podsumowanie

W obecnej formie urządzenie wymaga jeszcze dopracowania. Brak korelacji pomiędzy modelem a prototypem może wynikać z wykorzystania pojedynczego sygnału próbkującego, który wprowadza różne przesunięcia pasma do każdego kanału. Planowane prace na przyszłość obejmują stworzenie ulepszonej wersji prototypu. Wykorzystanie wielu sygnałów próbkujących umożliwi wprowadzenie procedury kalibracji anten w celu maksymalizacji zakresu ich działania. Ponadto, urządzenie będzie zawierać większy dystans między antenami, co pozwoli na lepsze odseparowanie sygnałów między sobą. Taka modyfikacja prototypu umożliwi walidację wyników modelu numerycznego.

Bibliografia

- [1] K.D. Skeldon, L.M. Reid, V. McNally, B. Dougan, C. Fulton, *Physics of the Theremin*, American Association of Physics Teachers, 1998.
- [2] W. Buller, B. Wilson, *Measurement and Modeling Mutual Capacitance of Electrical Wiring and Humans*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006.
- [3] C.B. Martin, J.S. Martinez, A. Ricchiuti, H.E. Gonzalez, C.H. Franco, *Study of the Interference Affecting the Performance of the Theremin*, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, 2012.
- [4] <https://www.gaudi.ch/OpenTheremin/>, *OpenTheremin V4*, dostęp 28.02.2024r
- [5] W.H. Hayt Jr., J.E. Kemmerly, S.M. Durbin, *Engineering Circuit Analysis*, McGraw Hill, 2012.

Analiza parametrów akustycznych sal ćwiczeniowych w szkołach muzycznych

Milena Faruga, Adam Pilch

faruga@student.agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Abstract Celem referatu jest analiza warunków akustycznych panujących w salach ćwiczeniowych w szkole muzycznej. W pracy zawarto wyniki pomiarów obiektywnych parametrów akustycznych 19 sal ćwiczeniowych. Wykazano, że akustyka w zbadanych salach jest znacząco różna, a wynika to głównie z ilości oraz rozmieszczenia materiałów dźwiękochłonnych w pomieszczeniach. Aby zweryfikować, jakie wartości parametrów akustycznych najbardziej odpowiadają muzykom oraz czy obowiązujące wymagania są wystarczające do osiągnięcia komfortowych warunków pracy w szkole muzycznej, przeprowadzono także ankietę wśród uczniów oraz nauczycieli dotyczącą subiektywnych odczuć, jakich badani doświadczają podczas gry w tych salach. Na podstawie wyników pomiarów oraz ankiety stwierdzono, że obowiązujące wymagania, dotyczące w szczególności czasu pogłosu, nie są wystarczające dla sal ćwiczeniowych. W ramach pracy stworzono także model jednego z pomieszczeń w programie CATT-Acoustic i przeprowadzono jego adaptację tak, aby czas pogłosu zbliżył się do pożądaných przez ankietowanych wartości.

1. Metoda badań

Pomiary parametrów akustycznych zostały wykonane w Zespole Państwowych Szkół Muzycznych w Żorach. Budynek ten pochodzi z roku 1903; w latach powojennych został przekształcony do celów szkolnych, a od roku 1998 siedzibę ma w nim szkoła muzyczna. W późniejszych latach przeprowadzony został remont zabytkowego budynku wraz z rozbudową szkoły o kolejny budynek. Przeprowadzono modyfikacje sal, polegające głównie na adaptacji akustycznej ścian tak, aby uczniowie i nauczyciele podczas zajęć oraz ćwiczeń odczuwali komfort pracy. Na ścianach pomieszczeń zastosowano materiały, które mają zapewnić odpowiednie właściwości akustyczne, m.in. panele akustyczne ściennie oraz panele akustyczne na suficie [1].

Badania przeprowadzono w 19 salach ćwiczeniowych, w których odbywają się lekcje gry na instrumentach. Pomiary zostały przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN ISO 3382-2:2009 [2]. Tor pomiarowy składał się z impulsowego źródła dźwięku (w postaci balonów) oraz odbiornika (rejestrator Zoom H1). W każdej sali wyznaczono dwie pozycje źródła oraz trzy pozycje odbiornika. W każdym pomieszczeniu zarejestrowano więc sześć odpowiedzi impulsowych, które następnie wprowadzono do programu Dirac, dzięki któremu otrzymano obliczone wartości parametrów akustycznych.

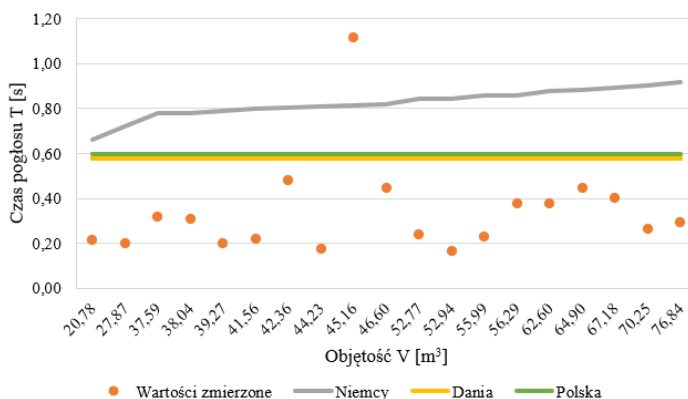
2. Wyniki pomiarów

Jednym z najważniejszych parametrów obiektywnych służących do oceny akustyki pomieszczeń jest czas pogłosu, który definiowany jest jako czas upływający od wyłączenia źródła dźwięku do momentu spadku poziomu ciśnienia akustycznego L_p w pomieszczeniu o 60 dB [3]. Uzyskany z pomiarów średni czas pogłosu jest najdłuższy w salach znajdujących się w piwnicy starego budynku, nieco krótszy na pierwszym piętrze i bardzo krótki na obu piętrach nowego budynku (Tab. 1). Jest to najpewniej spowodowane ilością i rozłożeniem materiałów pochłaniających w pomieszczeniach. Wyjątkowo wysoką wartość czasu pogłosu w pomieszczeniu numer 5 można wytłumaczyć faktem, iż jest ono całkowicie pozbawione elementów pochłaniających. Pomieszczenia znajdujące się na pierwszym piętrze w starym budynku cechują się wyższym czasem pogłosu – na sufitach wszystkich sal zamontowane zostały płyty akustyczne. W salach w nowym budynku zamontowano materiały o wysokich współczynnikach pochłaniania na suficie i panele ściennie na nawet trzech ścianach – efektem jest otrzymanie niskich wartości czasu pogłosu.

Tabela 1: Wyniki czasu pogłosu, uśrednione dla częstotliwości 500 Hz i 1000 Hz

Położenie sali	Nr sali	Objętość sali [m ³]	Czas pogłosu T_{20} [s]
Piwnica, stary budynek	5	45.16	1.12
	6	42.36	0.48
	3	46.60	0.45
	7	64.90	0.45
	11	67.18	0.40
I piętro, stary budynek	12	62.60	0.38
	8	56.29	0.38
	10	37.59	0.32
	13	38.04	0.31
	22	76.84	0.30
	18	70.25	0.26
	20	52.77	0.24
Nowy budynek	21	55.99	0.23
	17	41.56	0.22
	15	20.78	0.22
	16	39.27	0.20
	19	27.87	0.20
	24	44.23	0.17
	23	52.94	0.17

Porównując otrzymane dane z wartościami optymalnymi czasu pogłosu [4, 5] (Rys. 1) można zauważyć, że wszystkie wartości oprócz jednej (sala nr 5) są mniejsze od wartości 0.6s, a więc spełniają wymagania normy polskiej i duńskiej; nie spełniają natomiast normy niemieckiej, która to określa docelowe wartości tego parametru.



Rysunek 1: Porównanie wartości zmierzonych z wartościami zalecanymi

Parametr C_{80} opisuje, jak dobrze można w pomieszczeniu rozróżnić szczegóły sygnału dźwiękowego. Badane sale cechują się wysokimi wartościami przejrzystości dźwięku C_{80} – selektywność wykonywanej muzyki jest więc bardzo duża (Tab. 2). Różnica w wartościach przejrzystości dźwięku pomiędzy poszczególnymi punktami nie powinna przekraczać 3 dB – warunek ten spełniony jest w 9 z 19 sal. W pozostałych 10 pomieszczeniach, różnica ta jest większa, a więc przejrzystość dźwięku jest niejednolita na ich powierzchni – jednak przy tak wysokich wartościach tego parametru nie powinno to być zauważalne [6, 7].

Stosunek basów BR określa brzmienie basów w pomieszczeniu i jest definiowany jako stosunek czasów pogłosu częstotliwości niskich (125 i 250 Hz) do częstotliwości średnich (500 i 1000 Hz) [6]. Małe sale ćwiczeniowe powinny posiadać raczej płaską charakterystykę czasu pogłosu, a więc wartości parametru BR w takich pomieszczeniach powinny być bliskie wartości 1. Na podstawie Tab. 2 można zauważyć, że w większości pomieszczeń parametr przekracza tę wartość. Szczególnie wysokie wartości można zaobserwować w salach znajdujących się w nowej części budynku. Oznacza to, że jest w nich za dużo niskich częstotliwości, co może negatywnie wpływać na odbierane wrażenia słuchowe (dźwięk może być zbyt ciemny, ciężki).

3. Ankieta

Przeprowadzona została ankieta wśród muzyków dotycząca subiektywnych parametrów akustycznych. Wzięło w niej udział 56 osób – 20 nauczycieli oraz 36 uczniów klas I – VI drugiego stopnia badanej szkoły.

Rys. 2 przedstawia wyniki pierwszego pytania ankiety, związanego pogłosowością pomieszczeń. Jest to parametr subiektywny związany bezpośrednio z czasem pogłosu – jeżeli pomieszczenie ma wystarczająco długi czas pogłosu, mówi się, że

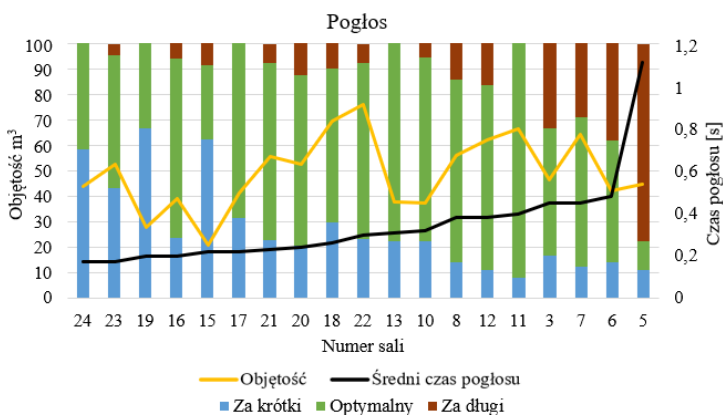
jest ono żywe, a gdy jest on zbyt krótki, pomieszczenie określane jest jako martwe lub suche [8].

Tabela 2: Wyniki pomiarów – przejrzystość dźwięku C_{80} oraz stosunek basów BR

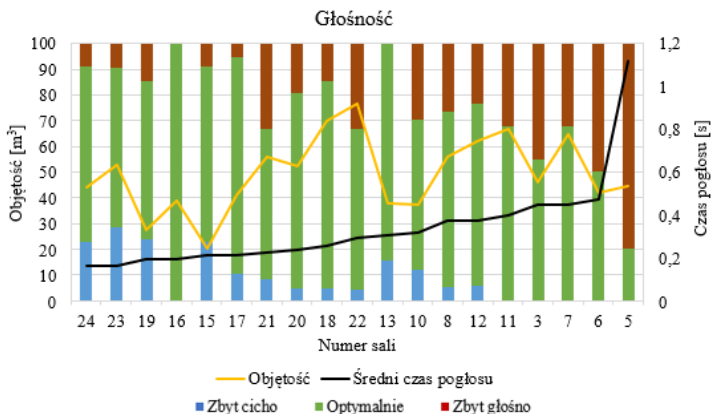
Nr sali	Przejrzystość dźwięku C_{80} [dB]			Stosunek basów BR
	Wartość maks.	Wartość min.	Różnica	
3	12.46	9.57	2.90	1.34
5	3.64	2.03	1.61	0.82
6	11.54	8.03	3.52	1.14
7	11.74	9.54	2.20	1.08
8	14.83	12.26	2.57	1.11
10	18.56	15.74	2.81	1.39
11	14.52	12.01	2.51	1.18
12	16.58	12.48	4.10	1.13
13	16.90	14.23	2.67	1.32
15	25.62	24.05	1.57	1.64
16	27.62	23.49	4.13	1.75
17	25.99	22.31	3.68	1.58
18	24.66	19.13	5.53	1.87
19	27.60	25.61	1.99	1.68
20	26.77	20.99	5.78	1.45
21	25.50	20.87	4.63	1.61
22	21.97	16.24	5.73	1.50
23	31.25	28.04	3.21	1.93
24	33.72	30.06	3.66	1.76

Głównym wyróżniającym się elementem jest to, że aż 77.8% badanych uważa, że pogłos w pomieszczeniu numer 5 jest zbyt długi. Czas pogłosu w nim wynosi 1.12s, a więc nie mieści się on w wartościach optymalnych. Poza tym, najwięcej osób twierdzi, że pogłos jest zbyt długi w pomieszczeniach o czasie pogłosu powyżej 0.4s. Przeciwnie – na zbyt krótki czas pogłosu muzycy skarżą się głównie w pomieszczeniach numer 15, 19, 24 (ponad 50% głosów). Najlepsze wyniki uzyskały sale 10, 11, 12, 13, których czasy pogłosu zawierają się w przedziale 0.31–0.4, z czego wynika, że jest to najbardziej odpowiedni przedział wartości tego parametru – wartości wyższe i niższe spotykają się już z krytyką muzyków.

W 7 z 19 sal ponad 30% badanych stwierdziło, że jest w nich zbyt głośno podczas wykonywania muzyki (Rys. 3). Są to pomieszczenia o dłuższych czasach pogłosu oraz o dużej lub średniej objętości (w stosunku do objętości badanych sal). Wśród nich zdecydowanie wyróżnia się sala nr 5, gdzie aż 80% badanych stwierdziło, że jest w nim za głośno – jest to zapewne spowodowane wysokim czasem pogłosu tego pomieszczenia. Najwięcej głosów, że w pomieszczeniu jest zbyt cicho otrzymały natomiast sale o krótkim czasie pogłosu i/lub małej objętości.



Rysunek 2: Wyniki ankiety – pogłosowość



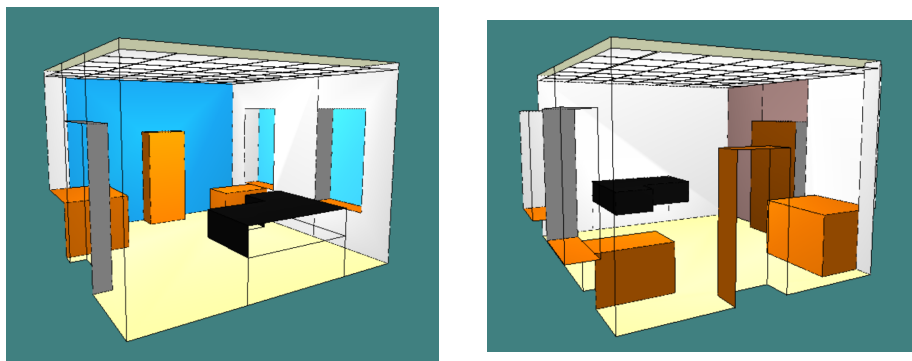
Rysunek 3: Wyniki ankiety – głośność

4. Model pomieszczenia

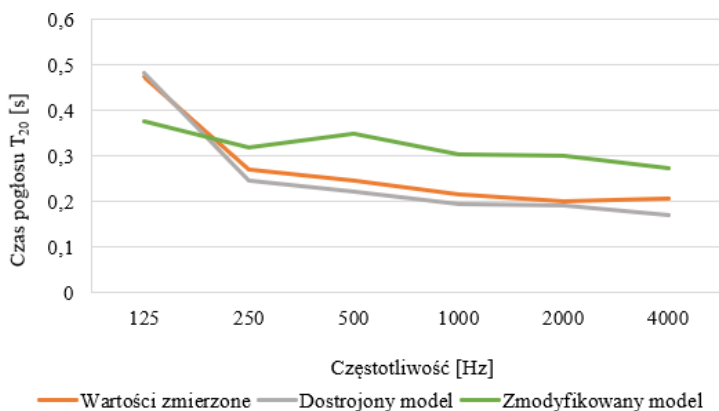
Wykonany został model w programie CATT–Acoustic jednego z pomieszczeń w nowej części budynku. Po dostrojeniu modelu przeprowadzono jego modyfikację – zaproponowano użycie innych materiałów tak, aby podwyższyć wartości czasu pogłosu oraz wyrównać jego charakterystykę w paśmie częstotliwości (Rys. 4). Zrezygnowano z paneli ściennych, położonych na powierzchni dwóch ścian. Zaproponowano za to użycie dyfuzora OptiDi na całej ścianie równoległej do fortepianu. Dodatkowo, na fragmencie jednej ze ścian umieszczono płytę ścienną Ecophon Akusto™ Wall C Extra Bass.

Efektorem tych działań jest uzyskanie bardziej wyrównanej w paśmie częstotliwości charakterystyki czasu pogłosu oraz podniesienie jego wartości o około 0,1s, tak

aby zbliżyć się do uzyskanych w ankiecie preferowanych przez muzyków wartości (0.3 – 0.4s). Porównanie czasu pogłosu rzeczywistego pomieszczenia z modelami przedstawiono na Rys. 5.



Rysunek 4: Model zmodyfikowanego pomieszczenia w programie CATT-Acoustic



Rysunek 5: Porównanie wartości zmierzonych z wartościami otrzymanymi z modelu

Na podstawie obliczeń wykonanych w programie CATT-Acoustic stwierdzono, że podwyższenie czasu pogłosu w sali nie wpłynęłoby negatywnie na wrażenie głośności. Wartości parametru G w małych pomieszczeniach nie powinny przekraczać 25–26 dB [9]. Dla modelu sali przed i po zmianie wartości tego parametru wynoszą odpowiednio 21.3 dB oraz 22.6 dB, nie przekraczają więc wartości optymalnych.

5. Podsumowanie

W niniejszym referacie poruszony został temat warunków akustycznych panujących w salach ćwiczeniowych w szkole muzycznej. Wykonano pomiary w pomiesz-

zeniach przeznaczonych do nauki gry na instrumentach w szkole muzycznej, w celu uzyskania wartości poszczególnych parametrów akustycznych. Przeprowadzona została także ankieta wśród uczniów oraz nauczycieli tej szkoły na temat subiektywnych parametrów akustycznych, co pozwoliło sprawdzić odczucia muzyków związane z akustyką sal. Wykonano również model jednego z pomieszczeń w programie CATT–Acoustic, a następnie zmodyfikowano go celem poprawy warunków akustycznych. Wyniki przeprowadzonych pomiarów wykazują znaczące różnice w akustyce poszczególnych pomieszczeń, dotyczące głównie czasu pogłosu. Wymagania odnośnie czasu pogłosu zwykle określają konkretną, wymaganą wartość lub wskazują wartości maksymalne. Jednak w tak małych salach, poprzez działania podejmowane w celu ograniczenia głośności, istnieje ryzyko uzyskania bardzo krótkiego czasu pogłosu. Biorąc pod uwagę, że są to pomieszczenia przeznaczone do wykonywania muzyki, ważne jest, aby osiągnąć pewną równowagę między tymi parametrami. Wyniki ankiety wykazały, że muzykom najbardziej odpowiadają wartości czasu pogłosu w przedziale 0.3–0.4s. Autorka postuluje więc wprowadzenie wymagań dotyczących wartości parametrów akustycznych typowo dla pomieszczeń służących do ćwiczeń na instrumentach muzycznych, określających zarówno maksymalne, jak i minimalne ich wartości. Przeprowadzenie modyfikacji modelu jednej z sal – zmiany użytych materiałów na ścianach – pozwoliło na zwiększenie długości czasu pogłosu do oczekiwanej przez muzyków wartości 0.3s, nie przekraczając przy tym dozwolonej maksymalnej głośności w pomieszczeniu.

Bibliografia

- [1] <https://www.zory.pl/miasto/inwestycje/zakonczone-inwestycje/rozbudowa-i-modernizacja-szkoly-muzycznej-1>, dostęp:16.11.2023
- [2] Norma PN-EN ISO 3382-2:2009 *Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach*
- [3] M. Metha, J. Johnson, J. Rocafort, *Architectural acoustics: principles and design*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice–Hall, 1999.
- [4] Norma PN-B-02151-4:2015-06 *Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań*
- [5] J. Radosz, *Obiektywne parametry oceny jakości akustycznej pomieszczeń edukacyjnych*, Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka, 6 (609), 2022, 12–15.
- [6] S. Krycki, K. Turowski, *Projekt akustyczny wnętrza w oparciu o systemy modelowania akustycznego*, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska, 2010.
- [7] T. Kamisiński, R. Kinash, A. Pilch, J. Rubacha, *Pomiar parametrów akustycznych auli głównej Politechniki Lwowskiej*, Fizyka budowlanej w teorii i praktyce, 2011, 6 (3), 23–26.
- [8] W. Mikulski, I. Warmiak, *Parametry i metody ich pomiaru charakteryzujące propagację dźwięku i warunki akustyczne w pomieszczeniach do pracy wymagającej koncentracji uwagi*, Czynniki zagrożeń zawodowych – hałas i drgania

- [9] J. H.Rindel, *New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance*, Forum Acusticum, 7–12 September, Kraków 2014.

Modelowanie numeryczne podstawowych komórek metamateriałów dźwiękochłonnych o dowolnej geometrii wewnętrznej

Piotr Książek, Bartłomiej Chojnacki

pioksiazek@student.agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Abstract Modelowanie metamateriałów dźwiękochłonnych często wykonywane jest z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Obliczenia numeryczne w tego typu modelach wymagają uwzględnienia efektów termowiskotycznych, które w przypadku nieskomplikowanych geometrii mogą być aproksymowane za pomocą efektywnych parametrów ośrodka. Nie jest to jednak możliwe w przypadku dowolnej geometrii. W tego typu modelach konieczne jest rozwiązanie równań akustyki nieliniowej, co wymaga zastosowania dokładniejszej siatki w celu odwzorowania efektów warstwy przyściennej płynu. Przedstawiona w pracy metoda pozwala na obliczanie współczynnika pochłaniania dźwięku dwuwymiarowych komórek metamateriałowych o dowolnej geometrii wewnętrznej. Wydajność metody została poddana weryfikacji na 20 losowo wygenerowanych strukturach. Omówiono wpływ parametrów geometrii na współczynnik pochłaniania dźwięku obliczony za pomocą opracowanej metody. Referat zaprezentuje również wpływ stabilności siatki oraz jej gęstości na uzyskane wyniki oraz czas obliczeń. Opracowana metoda pozwala na dokładne i oszczędne czasowo modelowanie komórek metamateriałowych o dowolnej geometrii, co może stać się przydatne w przyszłych pracach nad optymalizacją topologiczną metamateriałów akustycznych.

1. Wprowadzenie

Klasyczne metamateriały akustyczne, takie jak panele mikroperforowane, rezonatory Helmholtza, czy też rezonatory ćwierćfalowe są strukturami, których parametry można modelować na wiele sposobów. W przypadku materiałów klasycznych modelowanie może odbywać się przy pomocy metod analitycznych, a wzory poprawkowe o podstawach zarówno analitycznych jak i empirycznych pozwalają na dokładne modelowanie końcowych cech projektowanego metamateriału [1]. Dla struktur złożonych konieczne jest stosowanie bardziej zaawansowanych metod, na przykład metody macierzy przejścia [2], lub metody elementów skończonych.

Niemożliwe jest opracowanie dokładnego modelu metamateriału akustycznego bez zastosowania metod biorących pod uwagę energetycznych strat termicznych oraz wiskotycznych związanych z kontaktem pomiędzy ośrodkiem drgającym a sztywnymi ścianami struktury mechanicznej. Dla prostych geometrii straty takie można aproksymować przy pomocy efektywnych parametrów płynu [9]. Wyznaczenie tych efektywnych współczynników jest jednak bardzo trudne w przypadku geometrii złożonej. Opracowanie modelu metamateriału akustycznego o złożonej strukturze komórki podstawowej wymaga więc wykorzystania rozwiązania uwzględniającego

straty termo-lepkościowe występujące w warstwach przyściennych ośrodka. Metodą wiodącą w takich przypadkach jest Metoda Elementów Skończonych [10], której zastosowanie umożliwiłoby uzyskanie modelu dobrze reprezentującego funkcjonowanie rzeczywistej komórki złożonego metamateriału.

Metoda Elementów Skończonych wymaga określenia siatki punktów w których obliczane są wyniki równań fizycznych. W modelowaniu akustyki w ogólności przyjmuje się, że wystarczające zagęszczenie siatki występuje wtedy, gdy maksymalna odległość między poszczególnymi elementami jest nie większa niż najmniejsza długość fali występująca w modelu podzielona przez sześć [3]. Dla modeli numerycznych metamateriałów akustycznych wykorzystujących efektywne współczynniki propagacji fali siatka powinna być odpowiednio gęstsza [3]. W przypadku modeli stosujących rozwiązanie równań akustyki nieliniowej należy zastosować siatkę, która pozwala odpowiednio oddać gradient prędkości w warstwach przyściennych płynu [8].

Modelowanie fizyki termowiskotycznej jest bardzo kosztowne obliczeniowo, więc odpowiednie dopasowanie gęstości siatki do modelu jest kluczowym elementem każdego eksperymentu związanego z takimi obliczeniami. Utworzenie ogólnego modelu pozwalającego na obliczanie parametrów chłonności akustycznej metamateriałów o dowolnej geometrii wewnętrznej wymaga więc przeprowadzenia studium stabilności siatki dla wielu parametrów siatki warstw przyściennych oraz siatki ogólnej modelu numerycznego.

Metamateriały akustyczne o arbitralnej strukturze wewnętrznej często wiążą się ze złożonym problemem optymalizacji topologicznej. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest zastosowanie sieci generatywnej z przeciwnikiem (ang. Generative Adversarial Network). W celu wytrenowania modelu generatywnego tego typu konieczne jest jednak wyznaczenie parametrów akustycznych wielu losowych geometrii wewnętrznych [4, 7].

Celem niniejszej pracy było określenie odpowiednich z punktu widzenia czasu obliczeń parametrów siatki modeli numerycznych struktur metamateriałowych o dowolnie narzuconej geometrii wewnętrznej. W trakcie badań przeprowadzono studium wpływu parametrów skalujących zagęszczenie siatki modelu na obliczane parametry. Określono maksymalny dopuszczalny błąd modelowania i parametry siatki pozwalające na uzyskanie dostatecznie niewielkiego błędu przy jednoczesnym niskim czasie obliczeń.

2. Metodyka badań

Grubość lepkościowej warstwy przyściennej określona jest wzorem (1), gdzie ω [$\frac{rad}{s}$] jest częstotliwością kołową, ρ_0 [$\frac{kg}{m^3}$] jest gęstością statyczną ośrodka a μ [$Pa \cdot s$] określa lepkość dynamiczną płynu. [5] Po pewnych przekształceniach uzyskać można równanie 2, które wprost pokazuje grubość warstwy przyściennej w zależności od częstotliwości. Istotną obserwacją jest, że grubość tej warstwy maleje wraz z rosnącą częstotliwością. Siatka modelu numerycznego uwzględniającego straty ter-

mowiskotyczne powinna więc być zależna od częstotliwości obliczanych w ramach modelowania..

$$\delta_{visc} = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho_0}} \quad (1)$$

$$\delta_{visc} = 0.22 * \sqrt{\frac{100}{f}} \quad (2)$$

Przykładem programowym implementacji tego typu siatki jest element „Boundary Layers” w parametrach siatki oprogramowania COMSOL Multiphysics. Moduł ten wymaga także określenia liczby elementów na długości warstwy przyściennej, którą można aproksymować równaniem 3, gdzie $\delta_{visc_{min}}$ [m] oznacza grubość warstwy dla największej częstotliwości, a $\delta_{visc_{max}}$ [m] grubość warstwy dla najmniejszej. Wygenerowana w ten sposób siatka powinna odpowiednio reprezentować warstwy przyścienne występujące w strukturze akustycznej.

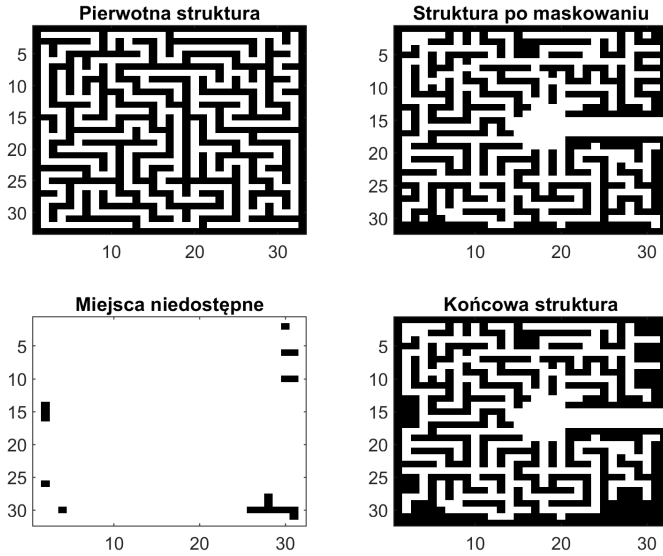
$$n = \left\lceil \left(\frac{\delta_{visc_{max}}}{\delta_{visc_{min}}} \right) \right\rceil \quad (3)$$

W celu wyznaczenia odpowiednich parametrów siatki konieczne było utworzenie metody generującej modele numeryczne metamateriałów o dowolnej strukturze wewnętrznej. Narzędziami wykorzystanymi w celu opracowania metody było oprogramowanie COMSOL Multiphysics oraz pakiet obliczeniowy MATLAB.

Aby skutecznie symulować dowolną geometrię wewnętrzną zdecydowano o utworzeniu dwudziestu przypadków geometrii losowej o strukturze labiryntowej, które następnie zostały zmodyfikowane maską złożoną z szumu białego oraz szumu Perlina [6]. Na losowe struktury nałożono także maskę zapewniającą drożność wlotu komórki metamateriałowej oraz wypełniono przestrzenie odcięte od głównej modelowanej objętości powietrza. Efektem przedstawionego procesu jest macierz dwuwymiarowa składająca się z wartości binarnych. Jest to struktura, którą można przedstawić jako bitmapę, której przykład przedstawiono na Rys. 1. Miejsca w których występuje ścianka struktury oznaczone są zerem, natomiast miejsca wypełnione powietrzem oznaczone są jedyneką.

Wykorzystanie bitmapy jako formatu danych wejściowych modelu struktury zostało obrane ze względu na uniwersalność metody. Możliwe jest całkowite rozłączenie algorytmu generującego strukturę metamateriału oraz modułu obliczeniowego wyznaczającego parametry akustyczne wygenerowanej struktury. Jest to w szczególności przydatne w przypadku zastosowania metod optymalizacji topologicznej, także przy użyciu sieci generatywnych z przeciwnikiem służących do generowania grafik.

Obliczenie współczynnika pochłaniania dźwięku wygenerowanej struktury zrealizowane jest przy pomocy skryptu pakietu MATLAB, którego zadaniem jest utworzenie modelu numerycznego na podstawie zadanej bitmapy zawierającej strukturę wewnętrzną komórki. Skrypt przyjmuje bitmapy o rozdzielczości 32 na 32 piksele. Każdy piksel bitmapy odpowiada kwadratowemu elementowi o boku długości 2 mm. Skrypt przewiduje możliwość dowolnego skalowania ostatecznej geometrii modelu.



Rysunek 1: Przykładowa geometria losowej struktury wewnętrznej metamateriału dźwiękochłonnego. Czarnym kolorem oznaczono ścianki struktury

Model numeryczny generowany przez skrypt zawiera w sobie dwie domeny akustyczne. Domena akustyki liniowej, zdefiniowana przy pomocy modułu Pressure Acoustics, znajduje się na zewnątrz struktury i służy modelowaniu geometrii rury impedancyjnej w której odbywa się pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku przez strukturę [12]. Objętość powietrza wewnątrz komórki metamateriałowej określona jest dziedziną akustyki nieliniowej, która definiowana jest przy użyciu modułu Thermoviscous Acoustics dostępnego w COMSOL.

Znajdująca się w domenie akustyki liniowej siatka określona jest zgodnie ze stosowaną [3] praktyką przy pomocy elementów trójkątnych o maksymalnym rozmiarze określonym równaniem 4, gdzie λ_{min} [m] oznacza najmniejszą długość fali występującą w modelu. Siatka określona w domenie akustyki nieliniowej zawiera w sobie dwa rodzaje elementów. Przy ścianach modelu znajdują się elementy siatki reprezentujące warstwy przyścienne generowane przy pomocy modułu Boundary Layers, który jako parametr przyjmuje grubość pierwszej warstwy oraz liczbę warstw przyściennych, które mają znaleźć się w modelu. W modelu podstawowym grubość pierwszej warstwy przyściennej określona jest wzorem (2), gdzie do modelu podawany jest parametr $\delta_{visc_{min}}$ [m] podzielony przez 6. Liczba warstw przyściennych określana jest przez wzór (3).

$$d_{max} = \frac{\lambda_{min}}{6} \quad (4)$$

Siatka modelu wewnątrz domeny akustyki nieliniowej określona jest elementami trójkątnymi o maksymalnej wielkości elementu uzależnionej od grubości warstwy przyściennej poprzez stosunek określony wzorem 5. Został on dobrany heurystycz-

nie w celu automatyzacji doboru gęstości siatki w bezpośrednim sąsiedztwie warstw przyściennych.

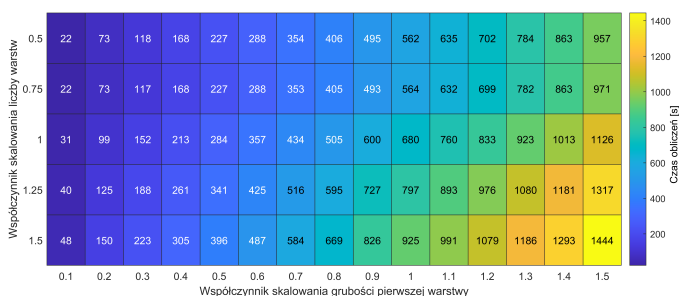
$$h_{max} = 2,5\delta_{visc_{min}} \quad (5)$$

Po testach modelu podstawowego rozpoczęto prace nad opracowaniem udoskonalonej siatki. Wprowadzono dwa parametry skalujące, których zadaniem było niezależne skalowanie liczby warstw przyściennych tworzonych przez siatkę oraz grubości pierwszej warstwy przyściennej. Skalowanie parametrów modelu odbywało się przez przemnażanie odpowiednich wartości przez współczynniki skalujące. Maksymalna wielkość elementu siatki wewnątrz objętości h_{max} [m] skalowana była w taki sposób, aby przy rosnącym współczynniku zwiększała się gęstość siatki. Współczynnik skalowania liczby warstw przyściennych został określony od 0,5 do 1,5 z krokiem 0,25, natomiast współczynnik skalowania grubości pierwszej warstwy przyściennej został określony od 0,1 do 1,5 z krokiem 0,1.

Analiza została przeprowadzona dla każdej możliwej pary współczynników skalujących na 20 losowo wygenerowanych strukturach labiryntowych metamateriałów akustycznych. Ostatecznie wyznaczone zostały parametry dla 1500 modeli.

3. Analiza wyników

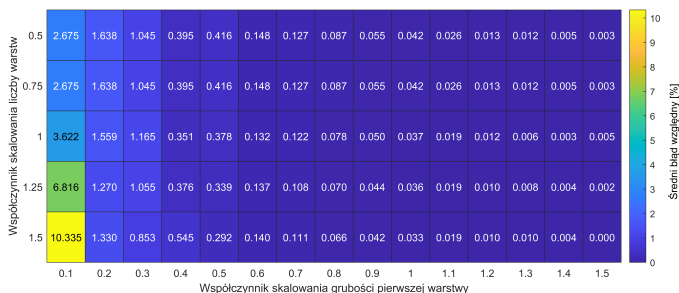
Na Rys. 2 przedstawiono uśredniony czas obliczeń dla każdej pary współczynników skalujących. Można tam zauważyć tendencję wzrostową w kierunku zwiększających się współczynników. Jest to zależność spodziewana, ponieważ więcej warstw przyściennych generuje więcej stopni swobody modelu numerycznego. Jednoczesne zwiększanie grubości warstwy przyściennej i zmniejszanie maksymalnego rozmiaru siatki trójkątnej w objętości struktury także zwiększa liczbę stopni swobody modelu.



Rysunek 2: Rozkład czasu obliczeń w przestrzeni współczynników skalowania siatki

Modele o największej liczbie stopni swobody określono jako modele reprezentujące najdokładniejszą aproksymację rzeczywistego zachowania układu. Na potrzebę analizy zbieżności siatki wyznaczono względem nich średni błąd względny dla pełnego zakresu częstotliwości oraz odchylenie standardowe średniego błędu względnego

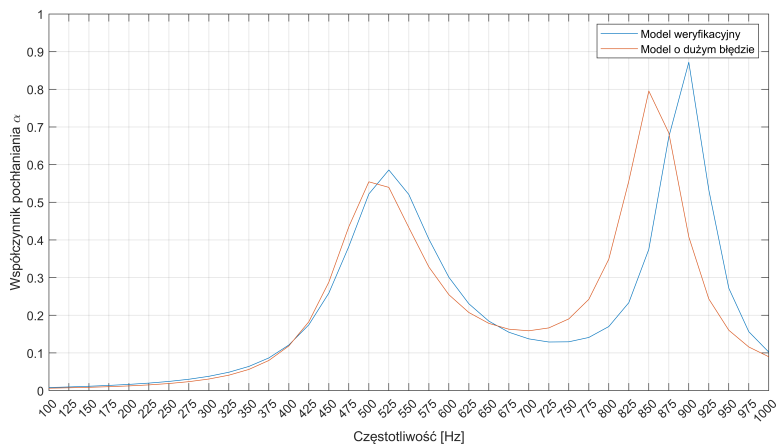
dla wszystkich modeli. Rozkład średniego błędu bezwzględnego przedstawiono na Rys. 3.



Rysunek 3: Rozkład średniego błędu względnego modelu w przestrzeni współczynników skalowania siatki

Zauważyć można, że przy bardzo małym współczynniku skalowania grubości warstwy błąd modelu rośnie przy wzrastającej liczbie warstw przyściennych. Możliwe jest, że przy tak niskim współczynniku skali grubości pierwszej warstwy siatka trójkątna, która także jest zależna od tego współczynnika osiąga bardzo małe zagęszczenie, co prowadzi do znaczącego zwiększenia błędu.

Na Rys. 4 przedstawiono porównane wyniki uzyskane dla pojedynczej geometrii dla modelu referencyjnego oraz modelu o największym błędzie. Zauważyć można, iż model błędny zwraca zmniejszony współczynnik pochłaniania, którego piki dodatkowo przesunięte są w stronę małych częstotliwości.



Rysunek 4: Wykres porównawczy modelu referencyjnego oraz modelu o największym błędzie. Wariant geometrii numer 14

Na potrzeby udoskonalenia siatki modelu uznano, że akceptowalnym maksymalnym błędem modelu jest 0,5%. Porównując ze sobą Rys. 3 oraz Rys. 2 można

zapropozować więcej niż jedną możliwą parę parametrów skalujących siatki, które pozwalają na uzyskanie dostatecznie małego wyniku błędu modelu przy jednoczesnym względnie niewielkim średnim czasem obliczeń pojedynczego modelu. Najbardziej obiecującymi w tym aspekcie wynikami są wyniki dla skali liczby warstw 0.5 oraz 0.75 przy współczynniku skali grubości pierwszej warstwy na poziomie 0.4.

4. Wnioski

Przeprowadzenie procesu udoskonalania siatki pozwoliło na zmniejszenie czasu obliczeń potrzebnego do uzyskania zbieżności modelu o żądanym maksymalnym błędzie. Odpowiedni dobór współczynników skalujących pozwoli na znaczące zwiększenie efektywności liczenia dużych ilości modeli losowych struktur metamateriałowych, co z kolei umożliwi szybkie i skuteczne tworzenie zbiorów danych dotyczących struktur akustycznych. Duża różnica między najmniejszym a największym uzyskanym średnim czasem obliczeń obrazuje jak konieczne jest przeprowadzanie badań wrażliwości siatki modeli numerycznych.

Wyniki przedstawione w niniejszym artykule zostaną wykorzystane do opracowania metody generowania struktur metamateriałowych wykorzystującej sieci neuronowe z przeciwnikiem. Uzyskane parametry siatki posłużą do wygenerowania modeli wyznaczających parametry akustyczne dużej liczby losowych struktur metamateriałowych. Dzięki przeprowadzonemu badaniu, obliczenia numeryczne tych parametrów będą wymagać znacznie mniej zasobów obliczeniowych. Wytyczne ustalone w trakcie tego eksperymentu pozwolą w przyszłości na lepszy dobór parametrów siatki modeli numerycznych metamateriałów akustycznych o dowolnej geometrii komórki podstawowej.

Bibliografia

- [1] F. Bie, H. Denayer, C. Claeys, E. Deckers, *Experimental Validation of the Length Correction Factor for Folded Quarter-Wavelength Resonators*, 2022.
- [2] N. Jiménez, J.-P. Groby, V. Pagneux, V. Romero-García, *Iridescent Perfect Absorption in Critically-Coupled Acoustic Metamaterials Using the Transfer Matrix Method*, Applied Sciences, 7(6),2017.
- [3] <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>, COMSOL 6.1 Acoustics Module User's Guide
- [4] C. Gurbuz, F. Kronowetter, C. Dietz, M. Eser, J. Schmid, S. Marburg, *Generative adversarial networks for the design of acoustic metamaterials*, The Journal of the Acoustical Society of America, 149(2),2021.
- [5] M. Berggren, A. Bernland, D. Noreland, *Acoustic boundary layers as boundary conditions*, Journal of Computational Physics, 371, 2018.
- [6] K. Perlin, *An image synthesizer*, Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1985.

- [7] K. Donda, Y. Zhu, A. Merkel, S. Wan, B. Assouar, *Deep learning approach for designing acoustic absorbing metasurfaces with high degrees of freedom*, Extreme Mechanics Letters, 56, 2022.
- [8] J.H. Joergensen, H. Bruus, *Theory of pressure acoustics with thermoviscous boundary layers and streaming in elastic cavities*, The Journal of the Acoustical Society of America, 149(5), 2021.
- [9] M.R. Stinson, *The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape*, The Journal of the Acoustical Society of America, 89(2), 1991.
- [10] N.M. Papadakis, G.E. Stavroulakis, *FEM Investigation of a Multi-Neck Helmholtz Resonator*, Applied Sciences, 13(19), 2023.
- [11] ISO 10534–2:2023, *Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes. Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance*
- [12] A. Chojak, W. Binek, B. Chojnacki, J. Pawlik, J. Idczak, *The effect of sound-absorbing walls on the acoustic properties of the modelled unit cell of a sound-absorbing metamaterial*, Vibrations in Physical Systems, 34, 2023.

Analiza wpływu zastosowanych metod wibroizolacji gramofonu typu lekkiego na pomiary przyspieszeń drgań

Aleksandra Sawczuk, Bartłomiej Chojnacki

asawczuk@student.agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Abstract Działania mające na celu ograniczenie powstawania i przenoszenia się drgań pomiędzy źródłem a otoczeniem określane są mianem wibroizolacji. Jej zastosowanie jest szczególnie istotne przy delikatnych układach, gdzie nawet najmniejsze wstrząsy są niepożądane. Najczęściej redukcję drgań osiąga się poprzez obniżenie częstotliwości rezonansowej układu, dzięki zwiększeniu jego masy. Takie rozwiązanie nie jest możliwe w przypadku delikatnych urządzeń, do jakich wliczają się gramofony typu lekkiego, o masie nieprzekraczającej 10 kg. W celu ograniczenia dodatkowych drgań na styku igły z płytą należałoby odizolować układ od podłoża, co można osiągnąć wykorzystując wibroizolację np. w postaci platformy. W niniejszej pracy przedstawiona zostanie analiza wibroakustyczna gramofonu – wpływu zastosowanych metod wibroizolacji na pomiary przyspieszeń drgań. Referat zaprezentuje porównanie badanych metod pomiarowych i obudzenia wibroakustycznego w różnych środowiskach. Omówione zostaną również zastosowane materiały wibroizolacyjne i ich wpływ na skuteczność ograniczenia drgań.

1. Wprowadzenie

Gramofon jest urządzeniem służącym do odtwarzania dźwięku zapisanego na płycie winylowej. W dzisiejszych czasach ponownie zyskuje na popularności, co przyczynia się do powstawania tańszych i w konsekwencji lżejszych modeli. Najważniejszym elementem gramofonu jest igła umieszczona na wkładce połączonej z ramieniem, która przesuwana się po płycie ułożonej na obrotowym talerzu. Mechanizm ten zaliczyć można do bardzo delikatnych układów, co powoduje, że wszystkie dodatkowe drgania są niepożądane.

Bardziej znaczące okazują się wibracje w niższych częstotliwościach. Pomimo występowania poniżej zakresu częstotliwości słyszalnych mogą je silnie modulować i wpływać na odbiór muzyki. Wynika to z problemów ze stabilnością układu w niskich częstotliwościach, który spowodowany jest m.in., rezonansem wkładki oraz ramienia. Występuje on, ponieważ układ ten zachowuje się jak efektywna masa, która jest związana z rowkiem płyty za pomocą elementów montażowych igły – o własnej masie, oporze mechanicznym i podatności [2, 5]. Częstotliwości poniżej rezonansu powodują ruch całego zespołu igły i ramienia, skutkując brakiem wytwarzania sygnału elektrycznego. Jednakże, w rezonansie, ruchy są znacznie wzmacniane, doprowadzając do zwiększenia sygnału o 6 do 20 dB, co może być niepożądane – powodować zniekształcenia przy reprodukcji dźwięku przez głośniki [2]. W celu ograniczenia wstrząsów przenoszonych przez meble lub podłogę konieczne byłoby odizolowanie urządzenia od podłoża. W przypadku wibroizolacji jest ona skuteczna

dopiero powyżej częstotliwości rezonansowej [1], dlatego najczęstszym rozwiązaniem jest zwiększenie masy układu. Nie jest ono możliwe do zastosowania w przypadku lekkich gramofonów, które dodatkowo, z powodu swojej niewielkiej masy, są jeszcze bardziej podatne na niechciane drgania. Z tego powodu najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie elementu w postaci platformy antywibracyjnej, który ograniczałby przenoszenie wstrząsów ze środowiska. W poniższym referacie przedstawiona zostanie analiza źródeł oraz miejsc występowania drgań w gramofonie. Omówione zostaną metody pomiarów drgań, otrzymane wyniki, a także możliwe do zastosowania rodzaje wibroizolacji.

Największy wpływ na drgania gramofonu wywołują źródła pochodzenia zewnętrznego. Najczęściej są to wibracje przekazywane przez podłoże oraz meble. Krytyczny zakres, obejmujący częstotliwości od 5 do 20 Hz, stanowi obszar, w którym wymienione źródła drgań nakładają się na siebie [3], zarówno w kierunku wertykalnym, jak i horyzontalnym. Dodatkowo niepożądane wstrząsy mogą również wynikać z wypaczeń płyt, spowodowanych zbyt wysoką temperaturą, ciśnieniem [5, 6] lub z powodu pracy własnej gramofonu, jednakże w tym przypadku pojawiają się dopiero w okolicach 20 – 80 Hz i wiążą jedynie z obecnością sygnału w rowkach płyty, jak i pracą silnika [4].

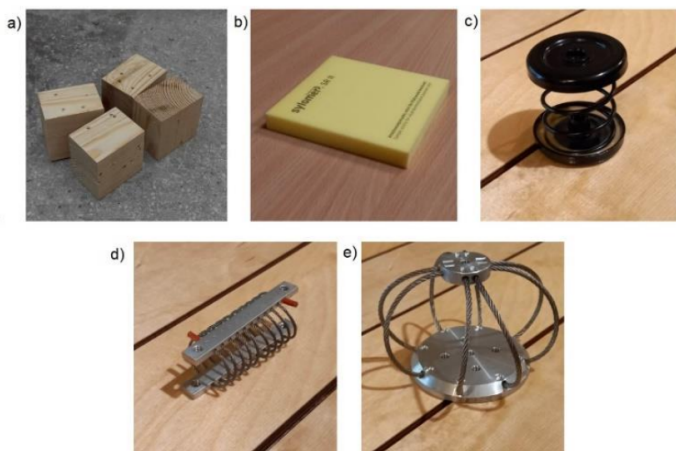
2. Metoda pomiarowa

Pomiary przeprowadzono w wytłumionym pomieszczeniu o betonowym podłożu, na którym ułożono gramofon. W pomiarach wibroizolacji istotne jest zachowanie powtarzalności pobudzenia wibroakustycznego używanego podczas nich. Jako pierwszy do pobudzenia drgań wykorzystano stukacz młotkowy. Kolejną metodą było zastosowanie młotka z zamontowanym czujnikiem impedancyjnym, poprzez uderzenie w obudowę gramofonu. Dodatkowo wykorzystano również pobudzenie akustyczne głośnikiem niskoczęstotliwościowym. Przed przystąpieniem do pomiarów wykonano kalibrację czujników oraz połączono tor pomiarowy. Cztery akcelerometry zostały umieszczone na kluczowych elementach konstrukcyjnych gramofonu. Najlepsze akcelerometry umiejscowiono na wkładce, ramieniu i talerzu. Czujnik trójosiowy zamocowany został na obudowie, a impedancyjny na podłożu. Rozmieszczenie akcelerometrów podczas pomiarów zostało przedstawione na Rys. 1.

Do osiągnięcia wibroizolacji posłużono się kilkoma rozwiązaniami, które przedstawiono na Rys. 2. Były to: elastomer o grubości 12,5 mm, sprężyny, a także wibroizolatory liniowe o kształtach podłużnym i okrągłym. Częstotliwości rezonansowe wszystkich zastosowanych rozwiązań zostały zawarte w zakresie 4–6 Hz, uwzględniając masę gramofonu bez dodatkowego obciążenia (6 kg). Dodatkowo przeprowadzono pomiary zarówno dla gramofonu stojącego na jego oryginalnych nóżkach, jak i dla gramofonu umieszczonego na drewnianych klockach (dla tego przypadku, a także każdego rodzaju wibroizolacji, nóżki były odmontowane). Elementy wibroizolacji rozmieszczano w czterech punktach, najbliższej krawędzi gramofonu.



Rysunek 1: Rozmieszczenie czujników na wkładce, ramieniu, talerzu, obudowie i podłożu



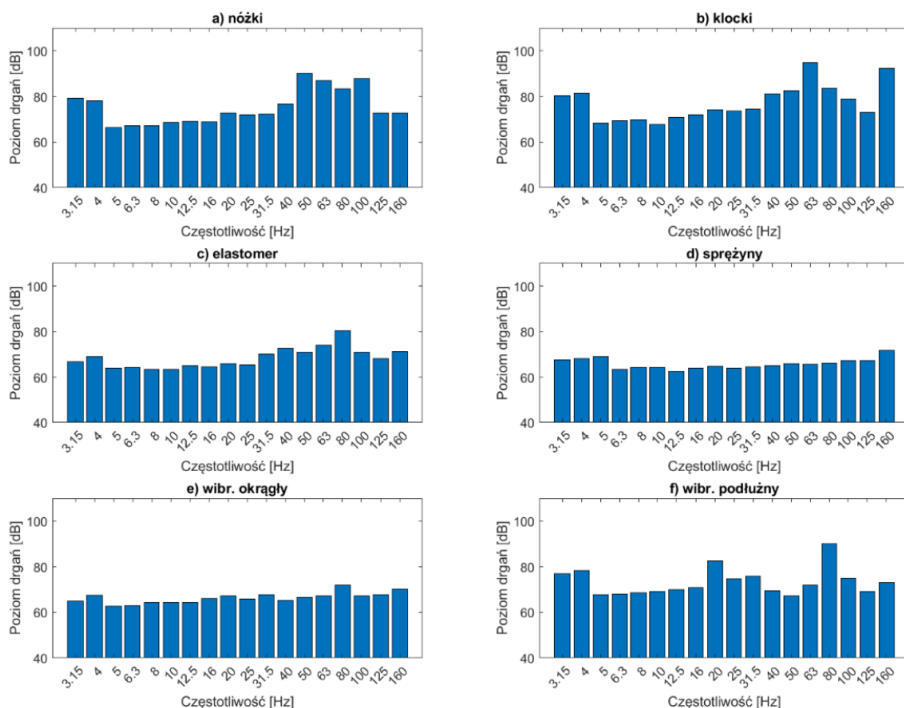
Rysunek 2: Wykorzystanie rodzaje wbroizolacji: a) klocki, b) elastomer, c) sprężyny, d) wibroizolator podłużny, e) wibroizolator okrągły

3. Wyniki

Do przeanalizowania otrzymanych wyników wykorzystano analizę widmową. Metoda ta porównuje amplitudy przyspieszeń drgań na konkretnym elemencie gramofonu przy wykorzystaniu wibroizolacji i bez niej. Przy jej zastosowaniu amplitudy

drgań powinny być mniejsze. Dla tej analizy potrzebne jest powtarzalne pobudzenie, dlatego do dalszej pracy wykorzystano dane uzyskane przy użyciu stukacza i pobudzenia akustycznego.

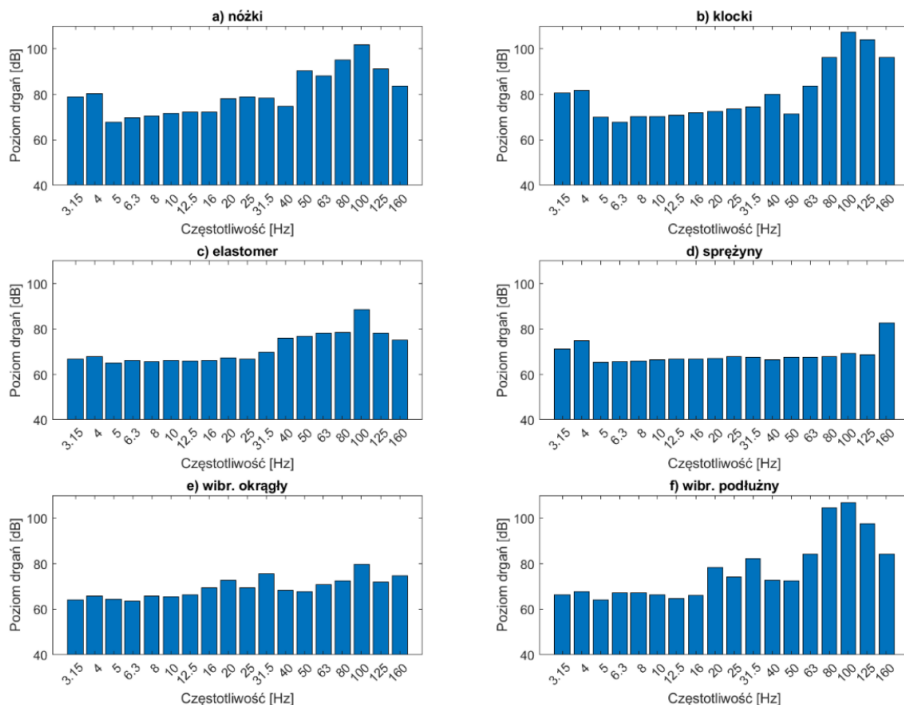
Podczas analizy otrzymanych wyników postanowiono wykorzystać dane otrzymane z czujników na wkładce oraz talerzu, przy wykorzystaniu każdego rodzaju wibroizolacji. Na Rys. 3. przedstawiono widmo tercjowe zbadane na talerzu (pobudzenie stukaczem młotkowym). Różnice między amplitudami drgań nie są znaczące, gdy gramofon stoi na drewnianych klockach lub na oryginalnych nóżkach, co może świadczyć o tym, iż nie mają one cech wibroizolacyjnych. W najniższych częstotliwościach nie następuje duża rozbieżność pomiędzy redukcją drgań przy zastosowanych wibroizolacjach, z wyjątkiem wibroizolatora podłużnego. Może być to spowodowane zbyt dużą sztywnością tego elementu. Największe zmniejszenie drgań na całym badanym zakresie nastąpiło dla sprężyn oraz wibroizolatora okrągłego. W przypadku sprężyn występował dodatkowy problem związany z dużą bezwładnością układu, kiedy został on wprawiony w ruch np. młotkiem, jednak nie zostało to zaobserwowane przy wykorzystywaniu stukacza młotkowego.



Rysunek 3: Widmo tercjowe przyspieszeń drgań na talerzu przy pobudzeniu stukaczem i wykorzystaniu wibroizolacji

Na Rys. 4 ukazane są widma zbadane na wkładce. W porównaniu do drgań na talerzu charakteryzują się większymi amplitudami, szczególnie w wyższych często-

tliwościach, jednakże w niższych zachowują podobne wartości. Ponownie największą redukcję drgań na całym zakresie zaobserwowano dla wibroizolatora okrągłego oraz sprężyn.



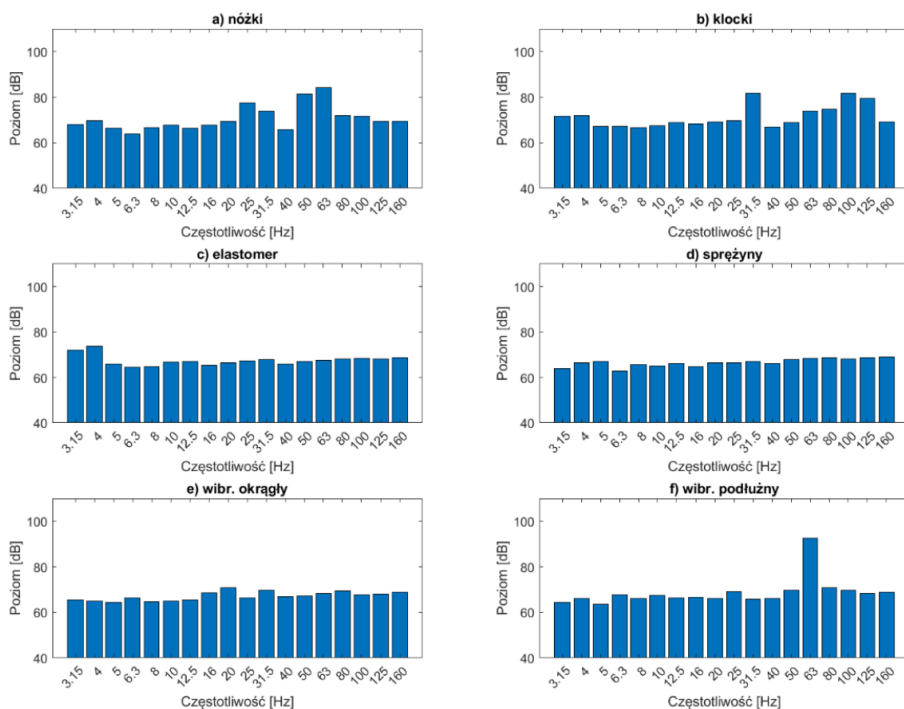
Rysunek 4: Widmo tercjowe przyspieszeń drgań na wkładce przy pobudzeniu stukaczem i wykorzystaniu wibroizolacji

Analiza widm tercjowych zbadanych na wkładce, przy wykorzystaniu głośnika niskoczęstotliwościowego została pokazana na Rys. 5. Wartości otrzymanych wyników i ich rozmieszczenie na wykresach różnią się znacząco od wcześniej ukazanych analiz. Świadczy to o dobrej powtarzalności i uniwersalności zastosowanych metod pobudzeń drgań. W tym przypadku również każda z wibroizolacji, z wyjątkiem wibroizolatora podłużnego, dała podobne rezultaty, jednakże ponownie najlepsze wyniki otrzymano dla sprężyn oraz wibroizolatora liniowego okrągłego.

4. Podsumowanie

Do wykonanej analizy wykorzystano dane otrzymane z czujników na najbardziej delikatnych i podatnych na niepożądane wstrząsy elementach układu – wkładce i talerzu. Wszelkie dodatkowe drgania występujące na wymienionych elementach miałyby największy wpływ na pracę urządzenia oraz odbiór odtwarzanej przez niego

muzyki. Do pobudzenia drgań wykorzystano stukacz młotkowy, który w powtarzalny sposób może symulować dźwięki uderzeniowe.



Rysunek 5: Widmo tercjowe przyspieszeń drgań na wkładce przy pobudzeniu akustycznym i wykorzystaniu wibroizolacji

Dokonano również analizy przy zastosowaniu głośnika niskoczęstotliwościowego. Dzięki powtarzalności obu wykorzystanych metod pobudzenia drgań otrzymane wyniki były do siebie zbliżone, co pozwoliło na porównywanie ich ze sobą. Podczas tych pomiarów, najlepszą redukcję drgań w niskich częstotliwościach osiągnęto dla sprężyn, a w szczególności dla okrągłego wibroizolatora liniowego. Dla każdej z badanych konfiguracji największe wartości amplitud drgań wystąpiły przy zastosowaniu klocków lub nóżek, zatem może to oznaczać, iż oryginalne nóżki nie są elementami wibroizolacyjnymi, co wskazuje na potrzebę dodatkowej warstwy chroniącej od niepożądanych wstrząsów.

W dalszej pracy nad wynikami należałoby wykonać analizę funkcji przejścia, wykorzystując dane otrzymane przy pomocy młotka impedancyjnego. Dzięki temu możliwe będzie sprawdzenie, w jakim stopniu drgania przenoszą się między obudową czy podłożem a wkładką gramofonu. Dodatkowo należałoby dokonać kolejnych pomiarów, skupiając się na zastosowaniu kombinacji wykorzystanych wibroizolacji, a także nowych rozwiązań np. elastomerów o innych sztywnościach.

Bibliografia

- [1] J. Michalczyk, G. Cieplok, *Wysokoefektywne układy wibroizolacji i redukcji drgań*, 1999.
- [2] C.R. Anderson, *A Vibration-Stabilizer System for Phonograph Reproduction*, Journal of the Audio Engineering Society, 27 (4), 285–290, 1979.
- [3] D.A. Barlow, *The Performance of Pickups at Low Frequencies and Isolation from External Shock*, AES Convention, L-52, 1975.
- [4] B.B. Bauer, *On the Measurement of Rumble in Phonograph Reproduction*, Journal of the Audio Engineering Society, 15 (2), 143–146, 1967.
- [5] L. Happ, F. Karlov, *Record Warps and System Playback Performance*, Journal of the Audio Engineering Society, 24 (8), 630–638, 1976.
- [6] T. Salava, *Warp- and Rumble-Tolerant Phonograph Pickup Design*, AES Convention, 2339, 1986.

Indeks autorów

- Ambroziński Ł., 5
Arawade S., 6
- Brzóska M., 31, 39
Burdzik R., 7
- Chojak A., 8
Chojnacka K.M., 9
Chojnacki B., 10, 31, 34, 36, 39, 63,
71
Czajka I., 11
Czapla M., 12
Czesak K., 13
- Derżko M., 32, 45
- Falinska K., 14
Faruga M., 33, 55
- Gawlik M., 15
Gorazd Ł., 16
Grochowina M.A., 35
- Idczak J., 17
- Kamisiński T., 17
Kania K., 22
Khan D., 7
Kleczkowski P., 13
Konieczny Ł., 7
Korytowski A., 18
- Kosz D., 10
Kozłowski P., 19
Książek P., 34, 63
Kucejko M., 20
- Leniowska L., 27
- Madej Z., 15
Majerek D., 24
Meissner M., 21
- Olszewski R., 18
- Pater M., 35
Pawlik P., 22, 32, 45
Piechowicz J., 6
Pilch A., 23, 33, 55
Przysucha B., 22, 24
Prędka E., 27
- Radosz J., 25
Rubacha J., 17, 26
- Sawczuk A., 36, 71
Suder-Dębska K., 11
- Świrk P., 27
- Wszolek T., 12, 28
Wszolek W., 15

Organizatorzy



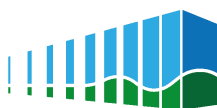
Polskie Towarzystwo Akustyczne
Oddział w Krakowie



Sponsorzy



International Commission for Acoustics



EPUFLOOR

AKUSTYKA

Epufloor Sp. z o.o.



Saint-Gobain Ecophon