



Komitet
Akustyki

NOWE WYZWANIA AKUSTYKI

jubileusz 60-lecia
Komitetu Akustyki PAN

opracowanie zbiorowe

Redakcja:

Lucyna Leniowska, Mirosław Meissner, Jerzy Wiciak

Warszawa 2025



Nowe wyzwania akustyki
Jubileusz 60-lecia Komitetu Akustyki PAN

**Komitet Akustyki
Polskiej Akademii Nauk**

WARSZAWA
MAJ 2025

Rada Programowa

prof. dr hab. inż. Jerzy Wiciak	prof. dr hab. inż. Lucyna Leniowska
prof. dr hab. inż. Mirosław Meissner	prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski
prof. dr hab. inż. Krzysztof Opieliński	prof. dr hab. Anna Preis

Komitet Organizacyjny

prof. dr hab. inż. Jerzy Wiciak	– <i>Przewodniczący</i>
dr hab. inż. Ireneusz Czajka, prof. AGH	– <i>Redaktor monografii</i>
dr inż. Katarzyna Suder-Dębska	– <i>Redaktor monografii</i>
dr inż. Cezary Kasprzak	– <i>Skarbnik</i>
dr inż. Dorota Młynarczyk	– <i>Sekretarz Naukowy</i>
dr inż. Roman Trojanowski	– <i>Sekretarz</i>

Współautorzy

Robert Barański, Bartłomiej Barwicz, Wojciech Batko, Rafał Bielas, Dariusz Bismor, Adam Brański, Roman J. Bukowski, Ireneusz Czajka, Andrzej Czyżewski, Zbigniew Dąbrowski, Grażyna Demenko, Andrzej Dobrucki, Marzena Dzida, Zygmunt Dziechciowski, Jacek Dziurdź, Zbigniew Engel jr, Jacek Gliński, Natalia Gorska, Tadeusz Gurda, Kamil Hajduk, Mikołaj Jarosz, Arkadiusz Józefczak, Tadeusz Kamisiński, Cezary Kasprzak, Maurycy J. Kin, Zygmunt Klusek, Maciej Kłaczyński, Iwona Kochańska, Łukasz Konieczny, Joanna Kopania, Tomasz Korbiel, Bożena Kostek, Marek S. Kozień, Piotr Kwiek, Lucyna Leniowska, Bogumił B. J. Linde, Zbigniew Łubniewski, Rufin Makarewicz, Mirosław Maliński, Jacek Marszał, Mirosław Meissner, Andrzej Miśkiewicz, Marek Moszyński, Elżbieta Nowicka, Andrzej Nowicki, Artur Nowoświat, Aneta Olszewska, Krzysztof J. Opieliński, Marek Pawełczyk, Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska, Paweł Pawlik, Janusz Piechowicz, Przemysław Plaskota, Dariusz Pleban, Marek Pluta, Anna Preis, Janusz Prusak, Andrzej Puchalski, Tadeusz Pustelny, Zbigniew Ranachowski, Wojciech Rdzanek, Paweł Rochowski, Piotr Rochowski, Ewa Skrodzka, Krzysztof Szemela, Małgorzata Szymiczek, Antoni Śliwiński, Piotr Tadzik, Jarosław Tęgowski, Paweł Wach, Andrzej Wicher, Jerzy Wiciak, Tadeusz Wszolek, Wiesław Wszolek, Edward Zorębski, Jan Żera.

Redakcja

Lucyna Leniowska, Mirosław Meissner, Jerzy Wiciak

Redakcja techniczna i skład

Katarzyna Suder-Dębska, Ireneusz Czajka – *AGH w Krakowie*

Projekt okładki

Roman Trojanowski – *AGH w Krakowie*

Wydawca

Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk
Polskie Towarzystwo Akustyki

ISBN: 978-83-61402-05-3

Skład wykonano na podstawie materiałów dostarczonych przez Autorów

- [98] Batko W., Bąkowski A., Radziszewski L. (2024) *Errors of addition of sound levels of correlated disturbances*, VIBRATIONS IN PHYSICAL SYSTEMS, 35, 3.
- [99] Batko W., Radziszewski L., Bąkowski A. (2023) *Limitations Of Decibel Algebra In The Study Of Environmental Acoustic Hazards*, AIP Conference Proceedings 2949, 020001, <https://doi.org/10.1063/5.0166002>
- [100] Batko W., Radziszewski L., Bąkowski A. (2024) *Uncertainty analysis of exceedances of permissible sound levels*, SEMINARIUM METROLOGICZNE INTELIGENTNE ROZWIĄZANIA METROLOGICZNE DLA PRZEMYSŁU PRZYSZŁOŚCI 4x.0 Organizator: Polska Unia Metrologiczna oraz Centrum Innowacji i Zaawansowanych Technologii Politechnika Lubelska, 20.03.2024, Kielce.
- [101] Batko W., Radziszewski L., Bąkowski A. (2024) *Sensitivity Modeling Of Selected Road Transport Noise Parameters*, 12TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC SESSION APPLIED MECHANICS NOVEMBER 15, Bydgoszcz.
- [102] Ren Z., Cheng Y., Chen M. et al, (2022) *A compact multifunctional metastructure for Low-frequency broadband sound absorption and crash energy dissipation*, Materials & Design, 215, 110462.
- [103] Woon Siong Gan (2018) *New Acoustics Based on Metamaterials*, Springer.
- [104] Sanjaya Kumara, Heow Pueh Lee, *Recent Advances in Acoustic Metamaterials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances*.
- [105] `ippt.pan.pl`
- [106] `silencions.pl`

1.2. Prace badawcze w Zakładzie Technologii Inteligentnych Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Mirosław Meissner

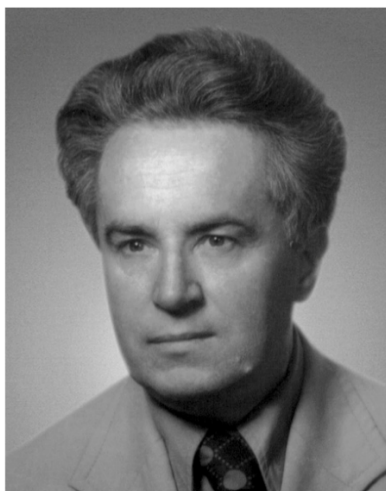
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

Zakład Technologii Inteligentnych

e-mail: `mmeissn@ippt.pan.pl`

Badania z zakresu akustyki środowiska i akustyki architektonicznej, prowadzone w Zakładzie Technologii Inteligentnych Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, są kontynuacją prac realizowanych w Pracowni Akustyki Środowiska Zakładu Aeroakustyki, którego kierownikami byli prof. dr hab. inż. Stefan Czarnecki i prof. dr hab. inż. Zbigniew Wesółowski, a więc uczeni o wielkich zasługach dla polskiej akustyki. W badaniach w dziedzinie akustyki, prowadzonych w Zakładzie Technologii Inteligentnych na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, można wyróżnić dwa nurty tematyczne. Pierwszy dotyczy teoretycznego opisu i symulacji numerycznych pola akustycznego w przestrzeniach zamkniętych o regularnych i złożonych kształtach, natomiast drugi – modelowania zjawiska pochłaniania dźwięku w ośrodkach porowatych i poro-sprężystych oraz projektowania kompozytów dźwię-

kochłonych. Animatorami rozwoju badań w tych nurtach tematycznych są: prof. dr hab. inż. Mirosław Meissner oraz dr hab. inż. Tomasz Zieliński, profesor instytutu.



(a) Prof. Stefan Czarnecki
(1925–1982)



(b) Prof. Zbigniew Wesołowski
(1933–2024)

Rysunek 1.1

Prof. Meissner jest twórcą modeli teoretycznych mających zastosowanie w badaniach w obszarze akustyki architektonicznej, a w szczególności akustyki pomieszczeń sprzężonych. Oryginalny aspekt realizowanych przez niego prac badawczych polega na wykorzystaniu w opisie pola dźwiękowego wielkości związanych z prędkością akustyczną, takich jak wektory aktywnego i reaktywnego natężenia dźwięku. Ponadto tym, co wyróżnia opracowaną metodę analityczną na tle innych metod stosowanych w akustyce przestrzeni zamkniętych jest fakt, że nie wprowadza ona ograniczeń co do kształtu pomieszczeń oraz umożliwia wyznaczanie energetycznych parametrów pola dźwiękowego zarówno w stanie ustalonym jak i przejściowym. Najważniejsze osiągnięcia naukowe w tej tematyce uzyskane w ramach prowadzonych badań przedstawiają się następująco:

1. Opracowanie nowej metody wyznaczania krzywej zaniku dźwięku, która wykorzystuje algorytm całkowania wstecznego Schroedera oraz rozwiązanie równania falowego w przestrzeni zamkniętej, w której znajduje się impulsowe źródło dźwięku.
2. Udowodnienie w sposób teoretyczny i obliczeniowy, że w przestrzeni zamkniętej o dźwiękochłonnych powierzchniach brzegowych charakterystycznymi obiektami w polu wektora aktywnego natężenia dźwięku są trójwymiarowe wiry energii akustycznej.

3. Stworzenie implementacji numerycznych do wyznaczania parametrów służących do obiektywnej oceny akustyki przestrzeni zamkniętych w stanie przejściowym, takich jak: czasy zaniku, wyrazistość, współczynnik klarowności, czas środkowy oraz wskaźniki udziału wczesnej i późnej energii bocznej.
4. Opracowanie nowej metody określania wymiarów pomieszczeń prostopadłościennych, przy których uzyskuje się minimalizację nieregularności odpowiedzi spektralnej pomieszczenia w zakresie małych częstotliwości.
5. Wyznaczenie analitycznej zależności na odpowiedź impulsową pomieszczenia o dowolnym kształcie dla zespolonych warunków brzegowych na powierzchni ścian pomieszczenia.
6. Identyfikacja zjawiska lokalizacji modów własnych w pomieszczeniach sprzężonych i zbadanie wpływu tego efektu na przestrzenną nierównomierność pola dźwiękowego w stanie ustalonym.
7. Zdefiniowanie nowej metryki do oceny jakości odtwarzania dźwięku w pomieszczeniach i wykonanie analizy dokładności reprodukcji impulsów tonalnych w pomieszczeniach sprzężonych.
8. Modelowanie i analiza numeryczna procesu wytwarzania dźwięku w przestrzeniach zamkniętych o złożonym kształcie przez źródło umieszczone na powierzchni brzegowej.

Badania dotyczące akustyki architektonicznej były w latach 2017–2021 prowadzone także w ramach grantu NCN pt. *Energetyczne parametry pola dźwiękowego w stanie ustalonym i przejściowym do obiektywnej oceny akustyki przestrzeni zamkniętych: modelowanie matematyczne i symulacje komputerowe*. Za realizację tego projektu kierujący nim prof. Meissner został uhonorowany Polską Nagrodą Inteligentnego Rozwoju 2020 w kategorii: Naukowiec przyszłości. Publikacje z zakresu akustyki wnętrz ukazały się w renomowanych czasopismach naukowych, m. in. *Acta Acustica united with Acustica*, *Applied Acoustics*, *Journal of Sound and Vibration* i *Journal of the Acoustical Society of America*. Prof. Meissner był także promotorem dwóch obronionych prac doktorskich:

- Zygmunt Raunmiagi, *Ocena stanu stożkowej powierzchni iglicy i gniazda rozpylaczy paliwa silników okrętowych z wykorzystaniem emisji akustycznej*, 2012,
- Łukasz Nowak, *Adaptive feedback control system for reduction of vibroacoustic emission*, 2014, promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Zieliński.

Był również współtwórcą patentu *Sposób i urządzenie do oceny stanu technicznego rozpylacza paliwa, do silnika z zapłonem samoczynnym*.

Badania prowadzone w Zakładzie Technologii Inteligentnych przez dr. hab. inż. Tomasza Zielińskiego były realizowane w ramach grantu NCN pt. *Mikro-geometria a propagacja i pochłanianie dźwięku w ośrodkach porowatych i poro-sprężystych* (2016–2021), a obecnie są realizowane w ramach grantu NCN pt. *Kompozyty dźwiękochłonne: sprzężone mechanizmy dyssypacji energii fal, modelowanie wieloskalowe i badania prototypów* (2022–2026). Zamierzeniem tych badań jest wytwarzanie i testowanie prototypów projektowanych kompozytów dźwiękochłonnych o dużej wydajności oraz pełna walidacja zaawansowanego modelowania matematycznego. Do

realizacji tego celu wykorzystane zostaną, wraz z innymi technikami, przede wszystkim nowoczesne technologie wytwarzania przyrostowego. Jak wiadomo, technologie te pozwalają na szybkie prototypowanie bardzo złożonych projektów. Ponadto jako składniki kompozytów mogą być stosowane różne struktury i materiały, na przykład membrany, a także mniej lub bardziej konwencjonalne materiały dźwiękochłonne. Przykładowo, szkielet kompozytu akustycznego o złożonej geometrii wynikającej ze zoptymalizowanego projektu można stosunkowo łatwo wydrukować w 3D, a następnie wypełnić organicznym materiałem włóknistym. Rozwój innowacyjnych kompozytów z dopracowanym doбором komponentów i zoptymalizowaną konstrukcją, pozwoli uzyskać struktury o dużej izolacyjności akustycznej w określonych zakresach częstotliwości przy zachowaniu małej objętości materiału, co umożliwi ich wykorzystanie w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym.

Bibliografia

- [1] Meissner M. (2012) *Acoustic energy density distribution and sound intensity vector field inside coupled spaces*, Journal of the Acoustical Society of America, 132(1), 228–238.
- [2] Meissner M. (2012) *The discrete Hilbert transform and its application to the analysis of reverberant decay of modal vibrations in enclosures*, Journal of Vibration and Control, 18(11), 1595–1606.
- [3] Meissner M. (2013) *Analytical and numerical study of acoustic intensity field in irregularly shaped room*, Applied Acoustics, 74(5), 661–668.
- [4] Meissner M. (2013) *Acoustic behaviour of lightly damped rooms*, Acta Acustica united with Acustica, 99(5), 845–847.
- [5] Zieliński T.G. (2014) *Microstructure-based calculations and experimental results for sound absorbing porous layers of randomly packed rigid spherical beads*, Journal of Applied Physics, 116(3), 034905, 1–17.
- [6] Meissner M. (2015) *Numerical investigation of sound field in enclosures: Evaluation of active and reactive components of sound intensity*, Journal of Sound and Vibration, 338, 154–168.
- [7] Meissner M. (2015) *Theoretical and numerical determination of low-frequency reverberant characteristics of coupled rooms*, Journal of Vibration and Acoustics–Transactions of the ASME, 137(4), 041013, 1–9.
- [8] Zieliński T.G. (2015) *Normalized inverse characterization of sound absorbing rigid porous media*, Journal of the Acoustical Society of America, 137(6), 3232–3243.
- [9] Meissner M. (2017) *Acoustics of small rectangular rooms: Analytical and numerical determination of reverberation parameters*, Applied Acoustics, 120, 111–119.
- [10] Zieliński T.G. (2017) *Microstructure representations for sound absorbing fibrous media: 3D and 2D multiscale modelling and experiments*, Journal of Sound and Vibration, 409, 112–130.
- [11] Meissner M. (2018) *A novel method for determining optimum dimension ratios for small rectangular rooms*, Archives of Acoustics, 43(2), 217–225.

- [12] Meissner M., Wiśniewski K. (2019) *Influence of room modes on low-frequency transients: Theoretical modeling and numerical predictions*, Journal of Sound and Vibration, 448, 19–33.
- [13] Zieliński T.G., Chevillotte F., Deckers E. (2019) *Sound absorption of plates with micro-slits backed with air cavities: analytical estimations, numerical calculations and experimental validations*, Applied Acoustics, 146, 261–279.
- [14] Meissner M., Wiśniewski K. (2020) *Investigation of damping effects on low-frequency steady-state acoustical behaviour of coupled spaces*, Royal Society Open Science, 7(8), 200514, 1–14.
- [15] Opiela K.C., Zieliński T.G. (2020) *Microstructural design, manufacturing and dual-scale modelling of an adaptable porous composite sound absorber*, Composites Part B–Engineering, 187, 107833, 1–13.
- [16] Meissner M., Zieliński T.G. (2020) *Low-frequency prediction of steady-state room response for different configurations of designed absorbing materials on room walls*, Proceedings of 29th International Conference on Noise and Vibration Engineering and 8th International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics, 463–477.
- [17] Meissner M. (2021) *Application of modal expansion method for sound prediction in enclosed spaces subjected to boundary excitation*, Journal of Sound and Vibration, 500, 116041, 1–18.
- [18] Opiela K.C., Zieliński T.G., Dvorák T., Kúdela Jr S. (2021) *Perforated closed-cell aluminium foam for acoustic absorption*, Applied Acoustics, 174, 107706, 1–17.
- [19] Meissner M., Zieliński T.G. (2022) *Impact of wall impedance phase angle on indoor sound field and reverberation parameters derived from room impulse response*, Archives of Acoustics, 47(3), 343–353.
- [20] Opiela K.C., Zieliński T.G., Attenborough K. (2022) *Limitations on validating slitted sound absorber designs through budget additive manufacturing*, Materials & Design, 218, 110703, 1–17.
- [21] Szemela K., Meissner M., Rdzanek W. (2023) *Efficient analytical method for computing the acoustic field inside enclosures of a mixed rectangular-cylindrical geometry*, Applied Acoustics, 202, 109182, 1–12.
- [22] Kowalczyk–Gajewska K., Maj M., Bieniek K., Majewski M., Opiela K.C., Zieliński T.G. (2024) *Cubic elasticity of porous materials produced by additive manufacturing: experimental analyses, numerical and mean-field modelling*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 24, 34, 1–22.