

27 marca 2025 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Zastosowanie metamateriałów akustycznych do konstrukcji przegród podwójnych o podwyższonej izolacyjności**

Autor rozprawy: mgr inż. Aleksandra Klimek

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono trafnie i jasno sformułowane?

W pracy podjęto badania dotyczące zastosowania metamateriałów akustycznych w lekkich przegrodach podwójnych w celu poprawy ich izolacyjności akustycznej. Teza dysertacji sformułowana w brzmieniu:

Zastosowanie metamateriałów akustycznych pozwala na znaczne zwiększenie izolacyjności akustycznej lekkich przegród podwójnych.

postuluje, że odpowiednio dobrane metamateriały, charakteryzujące się ujemną efektywną gęstością, sprężystością lub łączące obie te cechy, pozwalają na zwiększenie izolacyjności akustycznej przegrody poprzez dostrojenie ich częstotliwości działania do rezonansu układu masa–sprężyna–masa.

Sformułowanie zagadnienia naukowego jest trafne i jasno określone. Wskazuje ono na istotny problem badawczy polegający na ograniczeniach wynikających z zależności masa przegrody/częstotliwość – izolacyjność akustyczna (prawo masy). W tezie pracy wskazano na możliwość pokonania tego ograniczenia przez zastosowanie odpowiednio zaprojektowanych metamateriałów akustycznych. Praca obejmuje przegląd literatury, metody projektowe oraz analizę różnych typów przegród, badania analitycznie, numerycznie i eksperymentalne. Plan badań został przejrzysto zaprezentowany we wprowadzeniu do rozprawy w postaci graficznej na Rys. 2.

II. Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

W pracy przeanalizowano akustyczne metamateriały o ujemnej gęstości i sprężystości w konstrukcji podwójnych przegród akustycznych. W szczególności zbadano trzy typy metamateriałów:

1. **Metamateriał o ujemnej gęstości** wykorzystujący rezonatory mechaniczne, który lokalnie zwiększa izolacyjność akustyczną.
2. **Metamateriał o ujemnej efektywnej sprężystości**, bazujący na rezonatorach Helmholtza, umożliwiający poprawę izolacyjności bez zwiększenia masy przegrody.
3. **Metamateriał łączący obie cechy (ujemną gęstość i sprężystość)**, zoptymalizowany pod kątem maksymalizacji wskaźnika izolacyjności akustycznej w szerokim zakresie częstotliwości.

Przeprowadzone badania Autorka poprzedziła omówieniem właściwości metamateriałów akustycznych oraz metod ich projektowania. Rozważania te, zawarte w rozdziale 2. pracy, stanowiły punkt wyjściowy do zbudowania odpowiednich konstrukcji metamateriałów. W rozdziale tym Autorka zwróciła uwagę na koncepcyjne analogie pomiędzy budowaniem struktur z wykorzystaniem kryształów fonicznych i metamateriałów elektromagnetycznych oraz struktur fononicznych, które były podstawą do rozwoju badań i budowy metamateriałów akustycznych, w których występują rezonanse lokalne.

Dla trzech ww. rodzajów metamateriałów Autorka rozprawy zastosowała właściwy schemat badań polegający na analizie teoretycznej właściwości akustycznych metamateriałów, budowie modeli analitycznych, symulacjach numerycznych i badaniach eksperymentalnych.

Ad. 1. Celem tej części badań była poprawa izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej z wykorzystaniem rezonatorów mechanicznych. Autorka zaproponowała budowę przegrody podwójnej z układem rezonatorów mechanicznych w postaci dwóch konstrukcji metamateriałów płytowych, tj. elementem drgającym w postaci belki osadzonej na wsporniku (typ A) oraz z masą rezonującą wyciętą w płycie (typ B). Sformułowała następujące założenia projektowe: 1) częstotliwość rezonansu f_{DW} powinna być większa niż 100 Hz, 2) częstotliwość f_{DW} powinna mieć wartość, dla której błąd pomiaru izolacyjności akustycznej powinien być jak najmniejszy. Aby spełnić te założenia Autorka wykorzystwała przegrodę podwójną o częstotliwości rezonansowej większej niż 200 Hz jako bazę dla metamateriału.

Autorka zbadala izolacyjność akustyczną modelu analitycznego przegrody dla zakresów częstotliwości zdefiniowanych w sekcji 2.4.1. uwzględniających m.in. pierwszą częstotliwość rezonansową przegrody f_0 oraz tzw. częstotliwość koincydencji f_c danej wzorem (18). Dla metamateriału typu A uzyskano przerwę pasmową w zakresie 357 Hz÷395 Hz, a dla metamateriału typu B uzyskano przerwę pasmową w zakresie 357 Hz÷395 Hz. W analitycznym modelu w lewostronnym sąsiedztwie tych pasm i wewnątrz pasm uzyskano wzrost izolacyjności 5,9 dB dla metamateriału typu A i 9,8 dB dla metamateriału typu B w polu rozproszonym. Natomiast dla częstotliwości większych od górnych granic przerw pasmowych izolacyjność akustyczna dla tych

metamateriałów jest mniejsza w porównaniu do konstrukcji o ekwiwalentnej masie. Badaniach eksperymentalne izolacyjności akustycznej wykonanych metamateriałów pomiary przeprowadzono metodą natężeniową w komorze pogłosowej zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 15186-1.

Porównanie eksperymentalnych i analitycznych wyników pokazało, że dla metamateriału typu A nie uzyskano zamierzonego powielenia rezonansu, a obecność modów skrętnych osłabiła izolacyjność materiału. Pomimo odnotowanego wzrostu izolacyjności w zakresie przerwy pasmowej, efektywność tego rozwiązania była ograniczona. W konstrukcji typu B zastosowano dodatkowe podpory, zwiększono masę drgającą i zmieniono parametry geometryczne. Zabiegi te poprawiły izolacyjność akustyczną o 9,8 dB w zakresie przerwy pasmowej. Odnotowano też lepszą zgodność wyników analitycznych z pomiarami. Wadą tej konstrukcji było jednak znaczne zwiększenie masy przegrody o 120% w porównaniu do 21% dla typu A. Podsumowując, zastosowanie rezonatorów mechanicznych pozwoliło na zwiększenie izolacyjności akustycznej, przy czym konstrukcja typu B wykazała większą skuteczność, mimo wzrostu masy przegrody.

Ad. 2. Celem tej części badań była poprawa izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej poprzez wprowadzenie między przegrody heksagonalnej siatki rezonatorów Helmholtza. Zastosowano dwie wysokości komory rezonatora Helmholtza 25 mm (HR25) i 50 mm (HR50). Przyjęto też, że położenie przerwy pasmowej powinno mieścić się w zakresie częstotliwości wskaźnika izolacyjności właściwej R_W , tj. ok. 400 Hz. Podobnie jak dla badań rezonatorów mechanicznych wykonano kolejno: obliczenia efektywnej sprężystości i izolacyjności akustycznej, symulacje numeryczne dla wykreślenia krzywych dyspersyjnych oraz badania eksperymentalne weryfikujące poprawę wskaźnika izolacyjności akustycznej. Uzyskano bardzo dobrą zgodność częstotliwości przerwy pasmowej z rozważań analitycznych i symulacji numerycznych dla obu wysokości rezonatorów Helmholtza. Osiągnięta szerokość przerw pasmowych wyniosła odpowiednio 475÷778 Hz dla HR25 oraz 351÷690 Hz dla HR50.

W celu przeprowadzenia weryfikacji eksperymentalnej modeli analitycznych i numerycznych zbudowano przegrodę podwójną o rozstawie płyt 40 mm i 69 mm i uzyskano odpowiednio: częstotliwości rezonansowe $f_{DW}=340$ Hz i 460 Hz, wzrost izolacyjności akustycznej o 10,5 dB i 11,9 dB oraz poprawę wskaźnika izolacyjności odpowiednio o 4 dB i 6 dB. Zastosowana metoda badawcza pozwoliła uzyskać wyniki eksperymentalne zgodne z modelem analitycznym i analizą numeryczną. Uzyskano większą izolacyjność akustyczną w stosunku do metamateriałów o ujemnej efektywnej masie przy niezmienionej grubości przegrody.

Ad.3. Celem badań nad opracowaniem trzeciego typu z opracowanych metamateriałów było uzyskanie dużej izolacyjności akustycznej w szerokim zakresie częstotliwości. Osiągnięto ten cel dzięki wprowadzeniu do komórki rezonatorów Wignera-Seitza o więcej niż jednej częstotliwości rezonansowej. Konstrukcja została wykonana metodą maskowanej stereolitografii, a jej geometria została zoptymalizowana przy użyciu algorytmu genetycznego w celu maksymalizacji wzrostu wskaźnika izolacyjności akustycznej R_W . Przegrodę podwójną wyposażono w dwa rezonatory: mechaniczny ($f_0=360$ Hz) oraz rezonator Helmholtza ($f_R=540$ Hz) pozwoliło to na zwiększenie wskaźnika R_W o 7 dB oraz poprawę izolacyjności w szerokim zakresie częstotliwości 295 Hz÷2080 Hz średnio o 11 dB. Największy wpływ na takie wskaźniki izolacyjność miał

rezonator Helmholtza, podczas gdy rezonator mechaniczny działał w zakresie pierwszego minimum modelu o ujemnej sprężystości i maksimum skuteczności dla 325 Hz. Analiza numeryczna potwierdziła istnienie przerw pasmowych zgodnych z modelem analitycznym, a izolacyjność akustyczna osiągnęła swoje maksima w okolicach częstotliwości rezonansowych.

Eksperymentalna weryfikacja skuteczności metamateriału została przeprowadzona w komorze pogłosowej metodą natężeniową. Zmierzono tłumienie wtrącenia i porównano je z wynikami dla przegrody podwójnej oraz ekwiwalentnej. Średnia izolacyjność akustyczna metamateriału wyniosła 39,9 dB, co oznaczało wzrost o 4 dB względem przegrody ekwiwalentnej (35,9 dB) i o 17,1 dB w porównaniu do przegrody podwójnej (22,8 dB). Ponadto, widmowe wskaźniki adaptacyjne C i C_{tr} wzrosły odpowiednio o około 2 i 1 dB. Największy wzrost tłumienia zaobserwowano w zakresie częstotliwości rezonansu podwójnej ściany. Zwiększenie izolacyjności uzyskano bez zmiany masy przegrody i przy zmniejszeniu jej grubości o 19% (tj. o ponad 5 mm) względem przegrody ekwiwalentnej.

III. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i dostatecznie ważna?

Tematyka pracy doktorskiej jest aktualna i ważna. Istnieje duża potrzeba stosowania lekkich przegród m.in. w budownictwie, motoryzacji, lotnictwie i kosmonautyce. W tradycyjnych rozwiązaniach poprawę izolacyjności akustycznej uzyskuje się głównie przez zwiększanie masy oraz rozmiaru przegród. Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne, w tym również estetyczne istnieje potrzeba poszukiwania nowatorskich rozwiązań w tym zakresie. Zastosowanie metamateriałów akustycznych pozwala na optymalizację parametrów izolacyjnych bez znaczącego zwiększania masy przegród, przy jednoczesnej poprawie ich izolacyjności w szerokim zakresie częstotliwości.

W budownictwie dąży się do zwiększania komfortu akustycznego pomieszczeń i redukcji poziomu hałasu w przestrzeniach publicznych. W motoryzacji, lotnictwie i przemyśle odpowiednie wytłumienie wnętrza pojazdów i maszyn poprawia nie tylko komfort akustyczny, ale co ważniejsze może znacząco zmniejszyć poziom zmęczenia kierowców, pilotów i operatorów maszyn.

Cytowana w pracy literatura tematu z ostatnich kilku lat świadczy o aktualności badań pojętych w recenzowanej rozprawie.

IV. Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Autorka wykazała, że odpowiednia optymalizacja parametrów metamateriałów może prowadzić do istotnych ulepszeń w izolacyjności akustycznej przegród lekkich.

Oryginalne osiągnięcia badawcze Autorki rozprawy polegają na opracowaniu i optymalizacji metamateriałów akustycznych, które znacząco poprawiają izolacyjność akustyczną lekkich przegród podwójnych bez zwiększania ich masy i grubości. Postawiony problem został rozwiązany na drodze analizy modeli analitycznych symulacji numerycznych i budowie metamateriałów akustycznych o strukturze periodycznej. W toku badań zaprojektowano i poddano eksperymentalnej weryfikacji trzy rodzaje metamateriałów: o ujemnej efektywnej masie

(rezonatory mechaniczne), o ujemnej efektywnej sprężystości (rezonatory Helmholtza) oraz struktury hybrydowe łączące obie właściwości. Optymalizacja konstrukcji pozwoliła na osiągnięcie dużego wzrostu wskaźnika izolacyjności akustycznej oraz skuteczne tłumienie niekorzystnych rezonansów. Dla zaprojektowanego i wykonanego metamateriału uzyskano zwiększenie izolacyjności przegrody średnio o 7 dB, a w kluczowych zakresach częstotliwości uzyskano wzrost o 11 dB.

Dorobek autora ma istotne znaczenie w inżynierii akustycznej. Zastosowana metodologia badawcza wykorzystująca odpowiednio zaprojektowane metamateriały akustyczne stanowi nowatorskie podejście do budowania przegród o małej masie i grubości o izolacyjności nieosiągalnej dla tradycyjnie stosowanych rozwiązań.

Ww. osiągnięcia badawcze Autora rozprawy zostały udokumentowane w trzech współautorskich artykułach opublikowanych w czasopiśmie naukowych: Archives of Acoustics (100 pkt. MNiSW) i Vibrations in Physical Systems (70 pkt. MNiSW).

V. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanych poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

Autorka w rozdziale 2. rozprawy przedstawiła szeroki przegląd podjętej tematyki badawczej oraz teoretyczne podstawy projektowania metamateriałów akustycznych. Skupiła się na metamateriałach o ujemnej dynamicznej gęstości i sprężystości. Omówiła również techniki badania właściwości akustycznych metamateriałów za pomocą analizy krzywych dyspersyjnych oraz przedstawiła analityczne modele do wyznaczania izolacyjności akustycznej tych metamateriałów.

Wymienione wyżej elementy rozprawy świadczą o szerokiej i dogłębnej wiedzy Autorki z zakresu inżynierii akustycznej, która tematycznie mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

VI. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Praca jest przygotowana bardzo starannie, a nawet wzorcowo, pod względem redakcyjnym i graficznym. Jest napisana bardzo dobrze pod względem gramatycznym i stylistycznym. Układ pracy odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych. Nie zauważyłam braków merytorycznych rozprawy. Badania eksperymentalne są szczegółowo opisane i udokumentowane.

W sekcji 5.2.1 dotyczącej optymalizacji geometrii metamateriału znajduje się zdanie: *Pierwszorzędną funkcją celu było zmaksymalizowanie różnicy między ważonymi wskaźnikami izolacyjności akustycznej R_w metamateriału i przegrody podwójnej o ekwiwalentnej masie*

i niezmienionej odległości pomiędzy płytami. Proszę o pełniejsze wyjaśnienie jak był obliczany ważony wskaźnik izolacyjności i jak obliczana była różnica pomiędzy wskaźnikami izolacyjności metamateriału i przegrody podwójnej o ekwiwalentnej masie.

Za pewną niedogodność dla czytelnika rozprawy uważam zastosowaną numerację rysunków, tabel i równań wg kolejności ich występowania w tekście. Za bardziej odpowiednią uważałbym numerację składającą się z numeru rozdziału i kolejności występowania danego obiektu w rozdziale, np. numeracja (2.3) oznaczałaby trzeci w kolejności występowania rysunek, wzór lub tabelę w rozdziale 2 rozprawy.

VII. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

Wnoszę o wyróżnienie rozprawy. Autorka przedstawiła w niej oryginalne osiągnięcia badawcze w aktualnej i intensywnie rozwijanej tematyce metamateriałów akustycznych. Wykazała się dogłębną wiedzą w tematyce badań i inwencją projektową, a własności zaprojektowanych metamateriałów poddała analizie teoretycznej, symulacjom numerycznym, optymalizacji oraz weryfikacji eksperymentalnej. Wzorcowo udokumentowała przebieg badań. Do pracy dołączyła animacje przygotowane w środowisku ANSYS ilustrujące przemieszczenia i zmiany ciśnień w metamateriale o ujemnej efektywnej gęstości i sprężystości.

Wniosek końcowy

Ponieważ przedłożona do recenzji rozprawa:

- dokumentuje samodzielne rozwiązanie problemu naukowego,
- zawiera opis oryginalnych osiągnięć badawczych (wymienionych w sekcjach II i IV niniejszej recenzji) stanowiących istotnym wkład do dyscypliny naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne,
- prezentuje szeroką i dogłębną wiedzę Kandydatki w ww. dyscyplinie naukowej,

stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Aleksandry Klimek spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnioskuje do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Aleksandry Klimek do publicznej obrony.

