

Warszawa, 3.03.2025

Prof. dr hab. inż. Mirosław Meissner
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Klimek
pt. „Zastosowanie metamateriałów akustycznych do konstrukcji
przegród podwójnych o podwyższonej izolacyjności”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną niniejszej recenzji jest pismo prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziedzi-
ca, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektro-
technika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej, z dnia 9 stycznia 2025 ro-
ku z informacją o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Alek-
sandry Klimek pt. „Zastosowanie metamateriałów akustycznych do konstrukcji przegród
podwójnych o podwyższonej izolacyjności”. Rozprawa została przygotowana pod kie-
runkiem prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dobruckiego.

Recenzja została opracowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku
Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) oraz zgod-
nie z ogólnymi zasadami oceny prac doktorskich przez recenzentów.

2. Ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 91 stron. Praca składa się z sze-
ściu rozdziałów i bibliografii obejmującej 123 pozycje. Część zasadniczą rozprawy po-
przedzają: streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń oraz spis treści.

**2.1. *Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w rozprawie i czy zostało ono do-
statecznie jasno sformułowane przez Autorkę? Jaki charakter ma rozprawa
(teoretyczny, doświadczalny, inny)?***

Badania przedstawione w rozprawie dotyczą analizy wykorzystania metamateria-
łów akustycznych do poprawy izolacyjności lekkich przegród podwójnych. Rozdział
pierwszy stanowi wprowadzenie w zagadnienia związane z tematyką rozprawy. Podję-
cie takiej problematyki badawczej Autorka motywuje tym, że masywne przegrody za-
pewniające odpowiednią izolacyjność akustyczną nie zawsze mogą być stosowane w

praktyce z uwagi na ograniczenia dotyczące wymiarów i masy przegród. W takim przypadku zachodzi konieczność wykorzystania innych konstrukcji, takich jak np. lekkie przegrody podwójne, których własności izolacyjne powyżej rezonansu są dużo lepsze niż przegrody pojedynczej o masie identycznej jak przegrody podwójnej. Wadą przegród podwójnych jest natomiast duży spadek izolacyjności w obszarze rezonansu przegrody. W związku z tym sformułowane przez Autorkę cele rozprawy to zaprojektowanie i zbadanie skuteczności metamateriałów akustycznych:

- o ujemnej efektywnej gęstości,
- o ujemnej efektywnej sprężystości,
- struktury łączącej obie powyższe właściwości i optymalizowanej,

dla zapewnienia możliwie największej poprawy izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej. Przedstawione w kolejnych rozdziałach rozprawy wyniki badań stanowić będą podstawę do weryfikacji tezy rozprawy doktorskiej, że zastosowanie metamateriałów akustycznych pozwala na znaczne zwiększenie izolacyjności akustycznej lekkich przegród podwójnych.

Zagadnienie naukowe rozpatrzone w rozprawie jest w pełni aktualne i istotne naukowo. Zakres pracy został precyzyjnie określony przez Autorkę. Teza rozprawy została jasno sformułowana, a realizacja celów rozprawy jest ważna zarówno pod względem naukowym jak i aplikacyjnym. Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

2.2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł świadczącą o dostatecznej wiedzy Autorki? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W rozdziale drugim Autorka przeprowadziła analizę źródeł literaturowych dotyczących badań modelowych przy projektowaniu metamateriałów, w tym fizycznego opisu działania podstawowych metamateriałów i ich specyficznych właściwości efektywnych. W części 2.2 rozdziału Autorka przedstawiła dostępne w literaturze przedmiotu modele komórek metamateriałów o ujemnej efektywnej gęstości (rezonator mechaniczny) i ujemnej efektywnej sprężystości (rezonator Helmholtza). Są to modele pogładowe, w związku z tym niektóre parametry fizyczne metamateriałów w tych modelach nie są dostatecznie precyzyjnie zdefiniowane przez Autorkę. Dotyczy to przede wszystkim metamateriału z rezonatorem Helmholtza, ponieważ dane literaturowe pokazują (U. Ingard, JASA, 1953, 25(6), 1037–1061), że na takie parametry rezonatora Helmholtza jak poprawka wlotu oraz rezystancja strat, mają wpływ: środowisko w otoczeniu otworu rezonatora (rezystancja promieniowania, zewnętrzna poprawka wlotu), kształt i wielkość komory rezonatora (wewnętrzna poprawka wlotu), grubość wiskotycznej warstwy przyściennej (rezystancja strat w szyjce rezonatora na skutek lepkości ośrodka) oraz efekty nieliniowe (dodatkowa rezystancja i reaktancja w zakresie dużych amplitud sygnału akustycznego).

W części 2.3 rozdziału Autorka bazując na źródłach literaturowych omówiła zagadnienia istotne przy projektowaniu metamateriałów LRM jak: warunek podfalowej skali, periodyczność i strefa Brillouina, krzywe dyspersyjne oraz struktura pasmowa. W ostatniej części rozdziału drugiego Autorka przedstawiła metodę analityczną i model numeryczny do przewidywania izolacyjności przegrody podwójnej.

Podsumowując, uważam, że analiza źródeł literaturowych została w rozprawie przeprowadzona z należytą starannością. W większości są to prace anglojęzyczne, a ich wybór świadczy o dobrym rozeznaniu Autorki w literaturze przedmiotu oraz trendach i osiągnięciach światowej nauki. Cytowane publikacje zostały wykorzystane poprawnie a uzyskane na ich podstawie wnioski zostały jasno przedstawione. Pewne zastrzeżenia można mieć jedynie do zaprezentowanego modelu rezonatora Helmholtza, w którym współczynnik tłumienia, tak istotny przy wyznaczaniu izolacyjności przegrody podwójnej z metamateriałem o ujemnej efektywnej sprężystości, nie został dokładnie wyznaczony. Należy podkreślić, że Autorka ma świadomość tej niedoskonałości modelu teoretycznego, ponieważ, jak stwierdza w części 6.2 rozprawy, jednym z celów jej przyszłych badań ma być dokładniejsze przewidywanie współczynnika tłumienia rezonatora Helmholtza.

2.3. Czy Autorka rozwiązała postawione zagadnienia, czy użyła właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Badania związane z realizacją celów rozprawy zostały zaprezentowane w rozdziałach 3–5 i obejmowały zaprojektowanie metamateriałów i ich wykorzystanie do poprawy izolacyjności przegrody podwójnej. Pierwszą z badanych struktur była przegroda z metamateriałem LRM o ujemnej efektywnej gęstości, a więc układem z periodycznie rozmieszczonymi rezonatorami mechanicznymi. Autorka wykorzystwała w badaniach dwie konstrukcje metamateriałów: z elementem drgającym w postaci belki osadzonej na wsporniku (typu A) oraz z masą wyciętą w płycie (typu B). Obie konstrukcje wykonano z tektury i zaprojektowano tak, aby mogły oddziaływać na rezonans ściany podwójnej. Drugą z badanych struktur była przegroda podwójna z metamateriałem LRM o ujemnej efektywnej sprężystości w postaci dwóch wariantów układu z równomiernie rozmieszczonymi rezonatorami Helmholtza.

Pomiary skorygowanej natężeniowej izolacyjności akustycznej właściwej $R_{I,M}$ referencyjnej przegrody podwójnej, a więc przegrody bez metamateriału, i przegród z zaprojektowanymi metamateriałami Autorka przeprowadziła w komorze pogłosowej zgodnie z normą ISO 15186-1. We wszystkich przypadkach wyniki pomiarów potwierdziły poprawę izolacyjności akustycznej właściwej $R_{I,M}$ po umieszczeniu metamateriałów w strukturze przegrody podwójnej. Dla metamateriałów o ujemnej efektywnej gęstości stwierdzono znaczący wzrost izolacyjności w okolicach przerwy pasmowej: 5,9 dB dla typu A i 9,8 dB dla typu B, a także poprawę ważonego wskaźnika skorygowanej natężeniowej izolacyjności akustycznej właściwej $R_{I,M,W}$ o odpowiednio 3 dB i 5 dB. W

przypadku metamateriału o ujemnej efektywnej sprężystości Autorka uzyskała jeszcze większą poprawę izolacyjności przegrody, ponieważ maksymalny wzrost izolacyjności akustycznej właściwej $R_{I,M}$ w zakresie przerwy pasmowej wyniósł 10,5 dB dla pierwszego wariantu metamateriału i 11,9 dB dla wariantu drugiego, zaś wartość wskaźnika $R_{I,M,W}$ wzrosła o odpowiednio 4 dB i 6 dB.

Ostatnią badaną strukturą była przegroda podwójna z metamateriałem o ujemnej efektywnej gęstości i sprężystości w postaci periodycznej siatki rezonatorów mechanicznych i rezonatorów Helmholtza. Struktura została wykonana metodą maskowanej stereolitografii, a jej wymiary zostały zoptymalizowane za pomocą algorytmu genetycznego, w celu uzyskania maksymalnego wzrostu wskaźnika izolacyjności akustycznej. Skuteczność metamateriału akustycznego została następnie zweryfikowana eksperymentalnie w komorze pogłosowej metodą natężeniową. Z uwagi na małą objętość komory wielkością mierzoną było tłumienie wtrącenia IL dla przegrody z metamateriałem oraz struktur referencyjnych: przegrody podwójnej i przegrody ekwiwalentnej, tzn. przegrody podwójnej o takiej samej masie co przegroda z metamateriałem. Uzyskane wyniki pomiarów potwierdziły znaczną poprawę izolacyjności przegrody z metamateriałem, ponieważ maksymalny wzrost tłumienia wtrącenia w obszarze rezonansu przegrody podwójnej wyniósł 9,7 dB względem przegrody ekwiwalentnej i aż 21,1 dB względem przegrody podwójnej. Natomiast średnia ważona wartość tłumienia $\bar{IL}$ dla przegrody z metamateriałem była o 4 dB większa niż dla przegrody ekwiwalentnej i 7,1 dB większa niż dla przegrody podwójnej.

Podsumowując, Autorka rozwiązała w rozprawie szereg istotnych zagadnień związanych z analizą izolacyjności przegrody podwójnej i jej poprawą za pomocą metamateriałów LRM umieszczonych w strukturze przegrody. Dotyczy to w szczególności metody projektowania metamateriałów, w której Autorka wykorzystwała modele analityczne znane z literatury przedmiotu, a także metody numeryczne, takie jak algorytm genetyczny czy analiza modalna w środowisku ANSYS. Przyjęte przez Autorkę założenia teoretyczne i projektowe były uzasadnione, co w pełni potwierdziły wyniki badań doświadczalnych. Należy też podkreślić, że zaproponowane rozwiązania w zakresie projektowania metamateriałów są innowacyjne i posiadają duży potencjał aplikacyjny.

2.4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autorki, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie zagadnień postawionych przez Autorkę. W szczególności za oryginalne elementy rozprawy oraz samodzielny dorobek Autorki uważam:

- opracowanie na podstawie źródeł literaturowych modelu analitycznego do wyznaczania izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej z metamateriałami o ujemnej

efektywnej gęstości i ujemnej efektywnej sprężystości oraz przegrody podwójnej z metamateriałem charakteryzującym się równocześnie ujemną efektywną gęstością i ujemną efektywną sprężystością,

- zaprojektowanie przegród podwójnych z metamateriałami o ujemnej efektywnej gęstości i ujemnej efektywnej sprężystości i wykazanie na drodze doświadczalnej, że obecność metamateriałów w strukturze przegrody powoduje nie tylko znaczącą poprawę izolacyjności przegrody w okolicy przerwy pasmowej, ale także poprawę izolacyjności w całym zakresie analizowanym częstotliwości,
- zaprojektowanie struktury przegrody podwójnej z metamateriałem o ujemnej efektywnej gęstości i sprężystości oraz optymalizacja wymiarów struktury za pomocą algorytmu genetycznego, w celu uzyskania maksymalnego wzrostu wskaźnika izolacyjności akustycznej, następnie wykazanie na drodze doświadczalnej, że zastosowanie takiego metamateriału w strukturze przegrody podwójnej skutkuje znaczącym wzrostem izolacyjności względem referencyjnej przegrody podwójnej, a także poprawą izolacyjności w stosunku do przegrody ekwiwalentnej.

Podsumowując, rozprawa posiada udokumentowany oryginalny dorobek własny Autorki, a wyniki uzyskane w ramach realizacji celów rozprawy są interesujące i posiadają duży potencjał w kontekście dalszych badań. W mojej ocenie, pozycja rozprawy jest w pełni zgodna z aktualnym stanem wiedzy i poziomem techniki reprezentowanym przez literaturę światową.

2.5. Czy Autorka wykazała umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięźłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa jest napisana zwięźle i jasno, a każdy rozdział stanowi logiczną całość prezentującą spójny fragment przeprowadzonych badań. Wyniki w sposób przekonujący uzasadniają wyciągnięte na ich podstawie wnioski, co potwierdza, że Autorka posiada umiejętność poprawnego prezentowania uzyskanych przez siebie rezultatów badań. Tekst rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń pod względem językowym. Autorce nie udało się jednak ustrzec pewnych uchybień w przygotowaniu i redakcji pracy. Poniżej niektóre z zauważonych błędów i nieścisłości:

1. Str. v. Wszystkie akronimy powinny być zapisane czcionką wyprostowaną, nie kursywą, kolejne sugerowane zmiany: FDM zamiast *FD*, „metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu”, „FEM – Finite Element Method, FEA – Finite Element Analysis”, MSM zamiast *MS*, PWEM zamiast *PWE*.
2. Str. vi. Dwie wielkości: liczba falowa i współczynnik rozszerzenia przedziału ufności mają takie samo oznaczenie.
3. Str. ix. Proponuję następujące zmiany w spisie treści:

2.4.2. Teoria wielokrotnych odbić na przykładzie metamateriału o ujemnej efektywnej gęstości

2.4.3. Analiza układu masa-sprężyna-masa na przykładzie metamateriału o ujemnej efektywnej sprężystości

2.4.4. Modelowanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych

ponieważ ujemna może być tylko efektywna sprężystość, natomiast tytuł części 2.4.4 został niepoprawnie sformułowany.

4. Str. 1, wiersz 10 od dołu. Niegramatycznie „Niewielka masa ogranicza nie tylko na same właściwości izolacyjne”.
5. Str. 9, wiersz 4. Powinno być „w pracy Zhengyou Liu i in. z 2000 r.”.
6. Str. 12, pierwszy wiersz poniżej rów. (6). Powinno być „zmiana objętości powietrza w komorze rezonatora Helmholtza”.
7. Str. 19. Powinno być PWEM, FDM, FEM i MSM.
8. Str. 20, wiersz 2. Powinno być „mniejszej liczby węzłów”.
9. Str. 22. Powinno być „2.4.2. Teoria wielokrotnych odbić na przykładzie metamateriału o ujemnej efektywnej gęstości”.
10. Str. 22, wiersz 4 w części 2.4.2. Niewłaściwy szyk zdania, powinno być „Zgodnie z metodą podaną przez autorów”.
11. Str. 24, wiersz 1. Należy zmienić $\tau_{A,B}$ na $\tau_{a,b}$.
12. Str. 25. Powinno być „2.4.3. Analiza układu masa-sprężyna-masa na przykładzie metamateriału o ujemnej efektywnej sprężystości”.
13. Str. 26, wiersz 10 po rów. (26). Należy zmienić f_H na f_R .
14. Str. 27. Powinno być „2.4.4. Modelowanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych”.
15. Str. 32. Niezdefiniowany parametr σ w Tabeli 2.
16. Str. 34, wiersz 2 od dołu. Powinno być „każdy z rezonatorów”.
17. Str. 43, wiersze 1, 2 w części 4.1. Powinno być „układzie z ujemną efektywną gęstością”.
18. Str. 53, wiersz 4 od dołu. Powinno być „Każdy z wymienionych”.
19. Str. 54, wiersz 9 od dołu. Powinno być „masa m_2 jest odsunięta”.
20. Str. 60, wiersz 11. Powinno być „przegrodą ekwiwalentną w bardzo szerokim”.

21. Str. 69, wiersze 2, 3. Niepoprawne stwierdzenie „Łączna masa przegrody ekwiwalentnej (wliczając masę kleju epoksydowego) odpowiadała masie metamateriału z dokładnością 0,1 kg/m²”.
22. Str. 78, wiersze 2, 3 od dołu. Powinno być „Połączenie modelu analitycznego wraz z wynikami analizy modalnej” albo bardziej poprawnie „Połączenie modelu analitycznego z wynikami analizy modalnej”.
23. Str. 81. Błędny tytuł i rok wydania monografii [1].
24. Str. 84. W opisie publikacji [44] nieprawidłowy rok wydania i brak nazwy czasopisma, powinno być:
 Klimek, A., Dobrucki, A. (2024). Acoustic metamaterial design for levelling the impact of double-wall resonance on sound insulation, *Vibrations in Physical Systems*, 35(1), 1–9. <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2024.1.08>

Podsumowując, zauważone i wymienione powyżej błędy i usterki redakcyjne mają zdecydowanie charakter techniczny, w związku z czym nie umniejszają mojej pozytywnej opinii na temat przygotowania rozprawy doktorskiej.

2.6. *Jakie są wady i słabe strony rozprawy?*

Rozprawa nie posiada istotnych wad, zaś słabsze strony rozprawy nie są znaczące. Są one związane przede wszystkim z jej stroną redakcyjną i zostały przedstawione w poprzednim punkcie recenzji. Niewątpliwie te uchybienia mogłyby zostać wyeliminowane przy bardziej starannej edycji tekstu. Jeśli chodzi o uwagi merytoryczne, to poniżej zamieszczam listę zauważonych przeze mnie punktów niejasnych lub dyskusyjnych.

- Modele komórek metamateriałów o ujemnej efektywnej gęstości i ujemnej efektywnej sprężystości zostały omówione w sposób zbyt uproszczony (część 2.2). Po pierwsze, jeżeli w modelach uwzględni się tłumienie, to efektywna masa m_{eff} i efektywna sprężystość K_{eff} przyjmują wartości zespolone (rów. (5), (13)). Tak więc wykresy na rys. 6b i 7b ilustrują w rzeczywistości zależność części rzeczywistych m_{eff} i K_{eff} od częstotliwości kątowej. Po drugie, podane na str. 12 i 14 szerokości pasma, w których m_{eff} i K_{eff} mają ujemne wartości, są słuszne jedynie dla układów bezstratnych, ponieważ w przypadku układów stratnych na szerokość tego pasma mają także wpływ współczynniki tłumienia ζ_2 i ζ_R . Dobrą ilustracją tego wpływu są wyniki obliczeń pokazane na rys. 22a,b, które dowodzą, że dla dużych wartości współczynnika tłumienia ζ_2 część rzeczywista m_{eff} może być nieujemna. Oznacza to także, że w takim przypadku określenie „metamateriał o ujemnej efektywnej gęstości” jest bezzasadne.
- W modelu przegrody podwójnej z metamateriałem o ujemnej efektywnej sprężystości ważnym parametrem jest współczynnik tłumienia ζ_R drgań masy powietrza w szyjce rezonatora Helmholtza. Chociaż istnieje bogata literatura poświęcona temu zagadnieniu, Autorka nie podjęła w rozprawie próby oszacowania wartości tego

współczynnika na drodze teoretycznej. W związku z czym wartość współczynnika tłumienia ζ_R przy obliczaniu izolacyjności przegrody podwójnej z takim metamateriałem (część 4.3.1), Autorka określała na podstawie pomiarów izolacyjności akustycznej przegrody (część 4.3.2).

- Pomiary izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej z zaprojektowanymi metamateriałami zostały przeprowadzone w komorze pogłosowej metodą natężeniową. W przypadku metamateriałów o ujemnej efektywnej gęstości i ujemnej efektywnej sprężystości była to komora o objętości 67 m^3 , natomiast w przypadku optymalizowanej przegrody podwójnej z metamateriałem o ujemnej efektywnej gęstości i sprężystości była to miniaturowa komora pogłosowa o objętości $1,33 \text{ m}^3$. Tak duża różnica w warunkach pomiarowych powoduje, że trudno porównać uzyskane wyniki badań, ponieważ w pierwszym przypadku wielkością mierzoną była izolacyjność akustyczna właściwa $R_{I,M}$ w pasmach 1/3 oktaowych o częstotliwościach środkowych od 100 Hz do 1600 Hz, natomiast w drugim przypadku było to tłumienie wtrącenia IL w pasmach 1/3 oktaowych o częstotliwościach środkowych od 315 Hz do 3150 Hz.

3. Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Klimek pt. „Zastosowanie metamateriałów akustycznych do konstrukcji przegród podwójnych o podwyższonej izolacyjności” stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zapisanym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Rozprawa wykazuje ogólną wiedzę Autorki w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i dowodzi umiejętności prowadzenia zaawansowanych badań naukowych. Wobec tego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Klimek i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Mirosław Meissner