

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Aleksandry Klimek

na temat: „Zastosowanie metamateriałów akustycznych do konstrukcji przegród podwójnych o podwyższonej izolacyjności”

Podstawa prawna

Podstawą opracowania recenzji było zawiadomienie Prorektora Politechniki Wrocławskiej nr 04/01/D02/2025 o wyznaczeniu na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej nr 99/4/RDND02/2024-2028 z dnia 16 grudnia 2024 r.

Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Przedstawiona do recenzji rozprawa, pt. „Zastosowanie metamateriałów akustycznych do konstrukcji przegród podwójnych o podwyższonej izolacyjności”, porusza ważny i bardzo aktualny problem występujący w lekkich przegrodach dźwiękoizolacyjnych stosowanych w wielu dziedzinach techniki. Modyfikacje konstrukcyjno-materiałowe z użyciem metamateriałów mają obecnie ogromny potencjał rozwojowy do specjalizowanej ochrony przeciwdźwiękowej wymagającej minimalizacji grubości i masy przegród stosowanych w budownictwie, przemyśle maszynowym, lotniczym czy kosmicznym. Biorąc pod uwagę obecny stan nauki oraz tendencje rozwoju dziedziny, należy stwierdzić wysoką zasadność wyboru tematu rozprawy.

Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Sformułowana przez Autorkę dysertacji teza pracy brzmi: „Zastosowanie metamateriałów akustycznych pozwala na znaczne zwiększenie izolacyjności akustycznej lekkich przegród podwójnych”. Teza pracy często brzmi trywialnie i prowokuje do dyskusji nad formą postawionego problemu, co w tym przypadku też jest tematem otwartym. Autorka natomiast w rozdziale „1.2. Cel i teza pracy” rozwija opisowo zagadnienie opierając się na przejrzystym porównaniu wykresów izolacyjności akustycznej w funkcji częstotliwości dla przegrody płytowej pojedynczej, podwójnej oraz podwójnej z wkładem metamateriałowym. Przedział częstotliwości występowania rezonansu masa-sprężyna-masa jest kluczowy i został tu wskazany jako zakres do badania skuteczności metamateriałów wibroakustycznych zapewniających efekt zadeklarowany w tezie pracy. Według deklaracji Autorki, badane były zastosowania metamateriałów charakteryzujących się ujemną efektywną dynamiczną gęstością (z rezonatorami mechanicznymi), ujemną efektywną dynamiczną sprężystością (z rezonatorami Helmholtza) oraz struktury hybrydowe optymalizowane w celu maksymalizacji izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej. Zatem postawiony problem naukowy został trafnie i jasno określony.

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

Postawiony problem badawczy, jakim jest skuteczność zastosowania struktur metamateriałowych w celu zwiększenia wskaźnika izolacyjności akustycznych przegród podwójnych, został pozytywnie naświetlony. Należy stwierdzić, że ponad wszelką wątpliwość,

ustroje metamateriałowe mają potencjał do oddziaływania na strefę rezonansu masa-sprężyna-masa z użyciem metamateriałów wibroakustycznych, gdzie jak wykazała Doktorantka, najsukuteczniejsze są optymalizowane hybrydowe struktury oparte na rezonatorach Helmholtza skojarzone z rezonatorami mechanicznymi. Autorka dokonała szerokiego przeglądu stanu wiedzy w zakresie metamateriałów akustycznych oraz metod wykorzystywanych przy badaniach obliczeniowych i doświadczalnych złożonych struktur, gdzie parametrem wynikowym była izolacyjność akustyczna przegrody. Na tej podstawie zrealizowała typową drogę projektowo-badawczą od koncepcji poprzez symulacje obliczeniowe do prototypu struktury pozwalającej na wykonanie badań doświadczalnych, których wyniki posłużyły weryfikacji obliczeń dla rozwiązania postawionego problemu naukowego.

W dysertacji, Autorka przedstawiła dwie niezależne koncepcje przegród podwójnych, co pokazało szereg zróżnicowanych problemów i konieczność bieżącego dostosowywania metodyki badawczej i podejmowania dodatkowych badań. W pierwszej koncepcji wykorzystano płyty nośne struktury metamateriałowej wykonane z tektury o strukturze plastra miodu. Do płyt mocowano wielowariantowo elementy rezonujące wycięte z tektury litej lub tekturowe płyty plastra miodu w których każda komórka z wykonanym otworem była rezonatorem Helmholtza. W drugiej zaś koncepcji wykorzystano płyty poliwęglanowe i hybrydowe rezonatory (Helmholtza i mechaniczne) wykonane w technologii przyrostowej, co pozwoliło na bardziej precyzyjną predykcję parametrów i uzyskanie wysokiej zbieżności wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych na prototypie. Dla każdej konfiguracji rozważanych struktur, udokumentowano w pracy wielowariantowe wyniki obliczeń analitycznych, numerycznych i badań eksperymentalnych prototypów. Ponadto, wyznaczono dynamiczny moduł Younga tektury i innych materiałów zgodnie ze standardem ASTM E-756 tzw. metodą Obersta, następnie wyskalowano model w środowisku ANSYS i przeprowadzono analizę modalną belek. Laboratoryjne badania izolacyjności akustycznej wykonywano w komorze pogłosowej dużej oraz o zmniejszonych wymiarach metodą natężenia dźwięku w oparciu o normę ISO 15186-1. Izolacyjność akustyczna została obliczona także numerycznie w środowisku ANSYS, zgodnie z metodą impedancyjną.

Śledząc dokumentację przeprowadzonych przez Doktorantkę badań i symulacji obliczeniowych, należy podziwiać Jej determinację i pracowitość przekładającą się na różnorodność i ilość operacji, a fakt rozwiązania postawionego problemu naukowego, bezdyskusyjnie potwierdza posiadanie wysokich umiejętności posługiwania się najnowszymi technikami obliczeniowymi oraz metodyką prowadzenia badań naukowych z użyciem zaawansowanych współczesnych technik.

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

Tematyka pracy wpisuje się w aktualny ogólnoswiatowy kierunek badań nad metamateriałami akustycznymi i ich zastosowaniem w różnorodnych działach techniki od budownictwa po przemysł kosmiczny. Autorka wybrała bardzo ważny aspekt zwiększenia izolacyjności akustycznej przegrody podwójnej z użyciem metamateriałów i pokazała, że jest to możliwe.

Uważam, że głównym oryginalnym dorobkiem Autorki jest opracowanie zoptymalizowanej przegrody podwójnej z metamateriałem o ujemnej efektywnej gęstości i sprężystości, gdzie przeprowadziła złożony problem optymalizacyjny z zastosowaniem algorytmu genetycznego pokazując skuteczność tego procesu projektowego.



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

Rozprawa zawiera wszystkie elementy przewidziane w tego rodzaju opracowaniach. Autorka wykazała ogólną wiedzę teoretyczną w uprawianej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawę można zaliczyć do osiągnięć o charakterze naukowo-projektowym, gdyż rozpatrywane konstrukcje metamateriałowe oparto na zaawansowanych metodach obliczeniowych (analitycznych i numerycznych), zweryfikowanych doświadczalnie na zbudowanych prototypach. Uwagę zwraca różnorodność podejmowanych eksperymentów na drodze do uzyskania celu końcowego i zdolność Autorki do wykorzystywania dostępnych urządzeń do budowy stanowisk laboratoryjnych w celu weryfikacji obliczeń, nie mówiąc już o wysokiej pomysłowości przy tworzeniu obiektów badań z tektury i druku 3D.

Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Przytoczona we wstępie analiza stanu wiedzy rozwinięta w kierunku tematyki pracy, a następnie zastosowana w dysertacji, świadczy o właściwych i aktualnych podstawach do budowy serii eksperymentów przedstawionych w pracy. Zestawienie literatury obejmuje 123 publikacje z czego znaczny procent stanowią pozycje z ostatnich lat.

Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Zestawione poniżej wybrane uwagi krytyczne nie umniejszają oceny osiągnięć przedstawionych w innych punktach niniejszej recenzji, natomiast wskazują możliwości ulepszenia przyszłych opracowań. Sądę również, że wśród zawartych uwag znajdują się też przyczynki do konstruktywnej dyskusji nad rozwojem zagadnienia dotyczącego tematu.

Uwagi ogólne:

- Teza pracy powinna być sformułowana ze wskazaniem na efekt oddziaływania na rezonans masa-sprężyna-masa przegrody podwójnej
- Czytelnik dysertacji odczuwa zbyt słabe powiązanie i następstwo wynikowe pomiędzy poszczególnymi częściami opracowania
- Tektura w pracy jako bardzo ważny materiał do badań jest zbyt skąpo opisana. Zastanawia celowość użycia tak trudnego materiału do tego typu badań. Może były by wskazane obliczenia statystyczne dla zwiększenia reprezentatywności wyników?
- Opis próbek oraz prototypów używanych do badań jest bardzo skąpy i utrudnia zrozumienie intencji badawczych Autorki
- Czytelnik ma problem z interpretacją parametrów związanych z wyznaczaną różnymi metodami izolacyjnością akustyczną. Należy lepiej opisać wskaźniki i możliwości ich porównania.
- Sformułowania kojarzone z językiem potocznym i tzw. skróty myślowe obniżają ogólny odbiór pracy klasyfikowanej jako naukowa.
- Sformułowanie: ujemna gęstość (sprężystość) nie jest akceptowane w języku polskim. Winno być: ujemna efektywna gęstość (sprężystość)
- Metamateriał AKUSTYCZNY czy WIBROAKUSTYCZNY ?

Uwagi językowe i nazewnictwo:

- s.2, w.8,9,10 od dołu - Struktury metamateriałowe nie muszą być periodyczne.
- Rys.1 brak odwołania do źródła?
- s.4, w. 5 od góry – jest: pomiar wskaźnika, winno być: wyznaczenie wskaźnika
- s.10, w.4 od góry „...metamateriały płytowe...” Rezonatory rozłożone na płycie to struktury lokalnie rezonansowe / metamateriały wibroakustyczne -nie płytowe !

- Rys.9;10;11;12 nie podano odniesienia (są autorskie?)
- s.15 w.14 od dołu - „Pierwszą jest łatwe utrzymanie stałej częstotliwości rezonansowej, np. poprzez jednolity stosunek mas m i m lub jednolity współczynnik wypełnienia ϕ w całej strukturze.” - czy na częstotliwość rezonansową na pewno ma wpływ masa podstawy? ze wzorów dla metamateriałów wibroakustycznych to nie wynika, jakie są podstawy żeby tak twierdzić?
- s.19, w.17 od góry - parametrów materiału nie rozwija się w szereg Fouriera
- s.19, w.18 od dołu - „FE – Finite Elements Method”, raczej FEM
- s.19, w.6 od dołu – jak rozumieć „dokładna”, skoro MES to metoda numeryczna.
- Rozdział 2.4.1 - „Izolacyjność przegrody jednorodnej” – winno być izolacyjność akustyczna...
- s.21, w.15 od dołu – Izolacyjność nie spada ale posiada określone wartości dla poszczególnych częstotliwości.
- s.21, w.4 od dołu „Koincydencja zachodzi dla częstotliwości koincydencji f_c ,” przeredagować
- s.22, w.5 od góry „Koincydencja leży ...” ?
- Rozdz. 2.4.4 jest: „Model numeryczny metodą elementów skończonych” winno być: Model numeryczny z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych
- s.27, w.14 od góry „postać akustyczną, np. fali płaskiej lub mechaniczną – np. siły” - postać akustyczna to też mechanika - należy używać terminologii definiowanej – język potoczny
- s.30, w.1,2 od góry – zdanie niejasne – przebudować lub usunąć
- s.31 w.7 od dołu - „...pomiar tekstury...”?
- s.32, w.3 od góry – jest: magnetyczny; winno być: elektromagnetyczny
- s.32, w.5 od góry – dobroć czego?
- Tab.2 - wyjaśnić do czego były użyte zestawione dane?
- s.33, w.7 od dołu - czy mówimy o przemieszczeniu czy prędkości drgań?
- s.44, - Rysunek 26 i opis nie dostarczają oczekiwanych informacji dla czytelnika. Dlatego trudno zidentyfikować faktyczne warunki eksperymentu.
- s.45, w.5 od dołu - winno być: Rysunku 27a;
- Rys. 28 Modele opisane w rozdziale 4.2 i rysunek nie zostały opisane w tekście
- 4.3.1. „Analityczny model izolacyjności akustycznej” ??
- s.44 w. 15 od dołu - „...komorę Helmholtza...” - taka nazwa nie istnieje
- s.46 w.8 od góry - brakuje równań będących podstawą obliczeń. Jakie równania są brane pod uwagę przy obliczeniach parametrów akustycznych metodą elementów skończonych. Czy w modelowaniu HR były uwzględnione poprawki wylotu, parametry efektywne HR?
- s.46. w.15 od dołu - Jakie równania są brane pod uwagę przy obliczeniach parametrów akustycznych metodą elementów skończonych. Czy w modelowaniu HR były uwzględnione poprawki wylotu, parametry efektywne HR?
- s.47, w.7 od góry – założenie: „wewnętrzna płyta tekstury porusza się wraz z przegrodą zewnętrzną, tzn. jej masa jest wliczona do masy przegrody b;” - to jest poważne uproszczenie?!
- s.53, w.8 od góry – gdzie to pokazano? „po wykonaniu analizy modalnej komórki metamateriału z nadanym warunkiem periodycznym Blocha Floqueta, nie uzyskano planowanego powielenia się częstotliwości rezonansowej dla obu rodzajów belek zwróconych w kierunkach produkcyjnych CD i MD tekstury. Wobec tego jedynie belki zwrócone w kierunku osi x przyczyniły się do powstania przerwy pasmowej;”
- s.54, w.4 od dołu - mody skrotne w częstotliwościach ?
- s.58, w.11,6,3 od dołu - ... rezonansów o bardzo dużej dobroci; sztuczne wygaszenie ...?
- 5.2.2. Analityczne wyniki izolacyjności akustycznej. Winno być: ... badania izolacyjności.
- s.68, w.11 od góry – jest: ... przegrody... ; winno być: przegrody jednorodnej
- Rozdz. 4.3. winno być: ... wyniki badań izolacyjności ...

Wzory

- s.11 wzór (1) jest k winno być k^2
- s.12 wzór w. 8 od góry - to jest nawiązanie do równania (1), ale nie ma już tutaj F_c , czyli siły całkowitej. Ta siła nie jest równa 0 więc skąd takie przybliżenie?
- s.12 w.9 od góry - czym jest r ? nie jest wyjaśnione
- s.14 w.14 od dołu - „współczynnika wypełnienia ϕR ” czym jest ten współczynnik, jak się go wylicza?
- s.22 wzór (20) - ten wzór wymaga wyjaśnienia - z jakiej publikacji pochodzi? W konfiguracji masa-pow-masa, i w artykule z bibliografii [100] nie ma pierwiastków, a zamiast $(1-\alpha)$ jest α .
- s.26 w.19 od dołu – jest X_b winno być Z_b
- s.28 w.3 od dołu – wzór? - jak zadana jest ta siła i dlaczego dzielimy przez pole powierzchni? $_S$ - jest nieopisane jako zmienna, wiemy że to pole pow. ale nigdzie nie jest to wyjaśnione.
- Wzór (28) - skoro R jest zależne od kąta, to czy Z_0 też było zależne od kąta? Czy jest w postaci ρ_{0c_0} ?
- s.56 wzór (30) – jest: X_b winno być: Z_b

Podsumowanie recenzji

Pomimo pewnej liczby zauważonych błędów, dobrze oceniam zarówno zakres oraz wykonanie rozprawy doktorskiej. Praca jest niewątpliwym wkładem w rozwój nauki w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* oraz w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* w zakresie projektowania. Doktorant przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał ogólną wiedzę teoretyczną w swojej dyscyplinie, a szczególnie w swojej specjalności naukowej. Dowiódł też umiejętności samodzielnego prowadzenia prac badawczych.

Wobec powyższego stwierdzam, że mgr inż. Aleksandra Klimek w przedstawionej pracy wypełniła wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, oraz stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Tadeusz Kamisiński, prof. AGH

