

dr hab. inż. Andrzej Klepka prof. AGH  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie  
Wydział inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Robotyki i Mechatroniki

Kraków 02.02.2025

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Łabuńskiego

pt. ***Wpływ rodzaju materiału tłumiącego, temperatury pracy oraz geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji.***

Recenzja pracy doktorskiej została wykonana na wniosek Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej.

### **1. Wybór tematyki pracy doktorskiej**

Tematyka rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Łabuńskiego dotyczy ważnych zagadnień z punktu widzenia dynamiki strukturalnej, Swoim zakresem obejmuje zagadnienia tłumienia drgań konstrukcji i modelowania. Autor skupił się na strukturach wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, gdzie tego rodzaju zjawiska występują powszechnie, a ich amplituda oraz częstotliwość ma wpływ nie tylko na komfort podróżowania pasażerów, ale również na bezpieczeństwo. Praca wpisuje się tematyką w szereg aktywności naukowych podejmowanych przez zespół badawczy na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Drgania i hałas wpływają istotnie na komfort podróżowania statkami powietrznymi. Źródłem tych drgań są przede wszystkim silniki pracujące niejednokrotnie z olbrzymią prędkością obrotową oraz siły aerodynamiczne działające na kadłub samolotu. Obecne uwarunkowania wynikające z dostępnej technologii jak również niejednokrotnie z przepisów prawa narzucają konieczność dostarczania coraz bardziej wydajnych i mocniejszych silników lotniczych. Jednocześnie, redukując masę samolotu, do konstrukcji wprowadza się coraz lżejsze elementy, zastępując np. struktury metaliczne kompozytowymi. Niestety, pomimo wielu korzystnych aspektów redukcji masy, jak niższe zużycie paliwa, większy zasięg, etc., zdolność konstrukcji do tłumienia drgań maleje. Powoduje to niestety ograniczenia w wykorzystaniu pełnej mocy silników ze względu na niski komfort podróżowania. Konieczne są zatem badania w kierunku opracowywania nowych materiałów tłumiących wykorzystywanych jako pasywna wibroizolacja konstrukcji jak również w zakresie ich efektywności w warunkach odpowiadających rzeczywistym.

Wybór materiału tłumiącego w celu redukcji poziomu drgań wydaje się być procesem niezbyt skomplikowanym. Należy jednak pamiętać, że w strukturach wykorzystywanych w przemyśle lotniczym

istnieje o wiele więcej czynników wpływających na własności wibroizolacji. Zmienne warunki środowiskowe, ograniczenia w zakresie geometrii czy masa to tylko niektóre z tych czynników.

Specyfika produkcji dla branży lotniczej to przede wszystkim konieczność zapewnienia wysokiej jakości wytwarzania komponentów związanej nie tylko z komfortem, ale i z bezpieczeństwem lotu. Ważnym zagadnieniem jest również trwałość. Należy pamiętać, że czas eksploatacji statków powietrznych to zazwyczaj kilkadziesiąt lat. Zastosowane komponenty powinny zatem spełniać rygorystyczne wymagania we zakresie parametrów użytkowych jak również długości bezawaryjnej eksploatacji.

W aspekcie naukowym i badawczym przedstawiony problem jest ważny i aktualny, a jego rozwiązanie może mieć istotny wpływ nie tylko na poprawę komfortu użytkowania, ale również poprzez zmniejszenie niekorzystnych zjawisk drganiowych na wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy. Zaprezentowana w rozprawie tematyka badawcza wymaga znajomości wielu dziedzin nauki i techniki zaczynając na czysto inżynierskiej wiedzy związanej z dynamiką strukturalną poprzez przetwarzanie sygnałów, techniki pomiarowe oraz modelowanie. W mojej opinii praca ma charakter praktyczny, a rozwiązania problemów przedstawionych do rozwiązania oparte są o metody naukowe. Jest to zgodne z wymaganiami stawianymi dla rozpraw doktorskich. Badania prowadzone w ramach pracy doktorskiej przeprowadzone zostały w reżimie naukowym poprzez zastosowanie stosownych metod oraz weryfikacji uzyskanych wyników. Nie wszystkie przedstawione w pracy rozważania są wprawdzie nowe i konieczne do przedstawienia w rozprawie jednak ich biegła znajomość oraz umiejętność adaptacji do nowych aplikacji jest niezbędna w aspekcie efektu jakim jest analiza wpływu rodzaju materiału tłumiącego oraz jego konfiguracji, temperatury pracy i geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji. Z powyższych względów należy więc uznać, że podjęta przez autora tematyka pracy jest z naukowego punktu widzenia uzasadniona, a jej efekty pożądane zarówno w aspekcie poznawczym jak i praktycznym.

## 2. Tytuł, treść i układ rozprawy

Zaproponowany tytuł rozprawy „***Wpływ rodzaju materiału tłumiącego, temperatury pracy oraz geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji***” w sposób ogólny oddaje treści zawarte w pracy. Brak jest odniesienia do konkretnej aplikacji, w tym przypadku dla konstrukcji lotniczych.

Całość rozprawy została przedstawiona na 176 stronach wraz ze streszczeniem w wersji angielskiej. Bibliografia obejmuje 147 pozycji, przy czym są to prace autorów polskich i zagranicznych w większości wydane po roku 2005. Świadczy to o znajomości przez autora najnowszych trendów związanych z dynamiką konstrukcji, identyfikacją parametrów modalnych czy modelowaniem.

Treść pracy jest dobrze uzupełniona materiałem graficznym odnoszącym się głównie do wyników badań i analiz wykonanych przez autora oraz przyjętej metodologii postępowania. Wszystkie charakterystyki zawierają poprawne oznaczenia osi układów odniesienia. Użyty w pracy język jest zrozumiały, a przyjęta terminologia w większości poprawna i nie budzi zastrzeżeń. Wszystkie skróty oraz oznaczenia zmiennych podano w zestawieniu na początku pracy.

Rozdział 1 jest krótkim wstępem wprowadzającym czytelnika w tematykę pracy.

Rozdział 2 stanowi przegląd literatury, gdzie przedstawiono zagadnienia związane z drganiami. Skupiono się na aspektach hałasu i jego wpływu na człowieka, omówiono rodzaje tłumienia oraz jego miary, przedstawiono podstawy teoretyczne modelowania materiałów lepkosprężystych. W rozdziale można się również zapoznać z podstawami analizy dynamicznej struktur oraz metodami estymacji parametrów modalnych. Końcowa część sekcji przedstawia metody wibroizolacji stosowane w przemyśle lotniczym i samochodowym. Całość rozdziału została podsumowana wnioskami.

Rozdział 3 rozpoczyna zasadniczą część pracy. Przedstawiono tam przyjętą metodykę postępowania oraz opisano stanowisko badawcze wraz z aparaturą używaną w trakcie badań. Kolejne podrozdziały opisują prowadzone badania oraz wyniki związane z określeniem wpływu rodzaju materiału na zdolności dyssypacyjne. W podrozdziale 3.3 przedstawiono badania z zakresu wpływu temperatury na skuteczność pracy wibroizolacji.

Rozdział 4 traktuje o identyfikacji własności dynamicznych materiałów lepkosprężystych. Opisano metodykę badawczą tego zadania. Wyniki badań uzyskanych w tym etapie (zidentyfikowane współczynniki strat oraz moduły zachowawcze) posłużyły autorowi do przygotowania modelu materiału lepkosprężystego. Dla założonych parametrów dokonano walidacji modelu z danymi eksperymentalnymi. Dane zestawiono szczegółowo opisując uzyskane wyniki.

Rozdział 5 przedstawia badania nad oceną skuteczności pasywnej wibroizolacji. Do oceny wykorzystano analizę harmoniczną dla elementu konstrukcyjnego – fragmentu kadłuba samolotu Bombardier Dash-8 Q400. Stworzono model numeryczny struktury oraz wibroizolacji o geometrii odpowiadającej wymaganiom panelu. Rozdział wprowadza wskaźniki oceny skuteczności pasywnej wibroizolacji oparte dodatkowo o wskaźnik zmiany masy całości struktury. Przeprowadzono również analizy uwzględniające sposób wypełnienia fragmentu kadłuba.

Rozdział 6 to część podsumowująca całość prac, gdzie sformułowano dziewięć kluczowych wniosków oraz zaproponowano kierunki dalszych prac.

Podsumowując, struktura pracy jest poprawna. Szczegółowo przedstawiono metodykę badań, a wyniki skomentowano przedstawiając wnioski wynikające z dyskusji nad rezultatami badań.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

W pracy poruszono ważne zagadnienia związane z dynamiką strukturalną oraz zastosowaniu materiałów tłumiących do redukcji niepożądanych efektów związanych z drganiami. Na uwagę zasługuje użyteczny charakter pracy. Wyniki uzyskane w trakcie realizacji prac mogą być podstawą do praktycznych aplikacji zaproponowanych rozwiązań. Realizując poszczególne etapy doktorant wykazał się znajomością zagadnień, takich jak: mechanika, dynamika strukturalna, techniki pomiarowe, przetwarzanie sygnałów. Umiejętnie połączył wiedzę teoretyczną z wymienionych powyżej zagadnień z praktyczną aplikacją w praktycznym problemie naukowym. Część teoretyczna pracy zawiera kompendium wiedzy związanej z analizą dynamiki strukturalnej, a część naukowa ukazuje praktyczne jej zastosowanie do rozwiązywania nowych, wymagających zastosowania metod naukowych problemów.

Oceniając treść pracy należy stwierdzić, że poszczególne zagadnienia związane z częścią naukową są znane i od lat wykorzystywane w różnych dziedzinach nauki i techniki. Wartością pracy jest natomiast dostrzeżenie problemu wynikającego ze specyficznej aplikacji oraz umiejętny dobór narzędzi i metod do rozwiązania tego problemu. Właściwa analiza danych oraz umiejętny sposób przedstawienia wyników prowadzą do nowych z punktu widzenia techniki wniosków ze wskazaniem na możliwość aplikacji w praktyce. Pewien niedosyt pozostawia – w mojej opinii – niekompletność badań, do czego odniosę się szczegółowo w części recenzji dotyczącej uwag krytycznych

W mojej opinii do najważniejszych osiągnięć pracy można zaliczyć:

- Opracowanie metodyki badania materiałów tłumiących drgania z uwzględnieniem geometrii oraz warunków środowiskowych.
- Zdefiniowanie parametrów fizycznych materiałów tłumiących niezbędnych do poprawnego określenia zdolności tłumiących w zmiennych warunkach środowiskowych.

## 4. Uwagi krytyczne

Analizując treść rozprawy nasunąć mogą się pewnie uwagi oraz pytania. Są to:

1. Autor podjął się zadania analizy zdolności tłumiących materiałów wibroizolacyjnych w zmieniających się warunkach środowiskowych. O ile w pierwszej części rozważań, gdzie analizowane są struktury typu belkowego przedstawiono pełen proces analiz, to w części dotyczącej analizy panelu kadłuba samolotu dokonano tylko rozważań w zakresie modelu takiego elementu. Dodatkowo, nie przeprowadzono dla badanej struktury badań związanych z wpływem temperatury. Czy niemożliwe było przeprowadzenia badań weryfikacyjnych na strukturze rzeczywistej? Jeśli tak, dlaczego nie zdecydowano się na analizę innego, dostępnego elementu konstrukcyjnego.
2. Przedstawione badania, pomimo, że zakresem odpowiadają tytułowi wydają się być niekompletne. Część badań związanych z wpływem temperatury wykonano dla struktur belkowych w pełnym zakresie, podczas gdy dla elementu kadłuba przeprowadzono badania numeryczne związane tylko z wpływem geometrii wibroizolacji. Czy jest zatem możliwe określenie wpływu temperatury na skuteczność wibroizolacji tylko na podstawie wyników uzyskanych w rozdziale 5.?
3. W jaki sposób ustalono zakres temperatur w prowadzonych badaniach? Pytanie wynika z faktu, że autor pracy odnosi się do aplikacji struktur tłumiących w lotnictwie i przemyśle samochodowym. W obu przypadkach, zakres temperatur w jakich operują wymienione środki transportu jest zdecydowanie większy. W przypadku samolotów, bardzo niskie temperatury są wręcz normalnymi warunkami pracy. Założony zakres temperatury znacząco odbiega od tych występujących w rzeczywistości. Czy możliwe jest zatem ekstrapolowanie wyników i wnioskowanie dotyczące zachowania się wibroizolacji w temperaturze np.  $-50^{\circ}\text{C}$  na podstawie rezultatów uzyskanych w trakcie badań?
4. W jaki sposób wybrano punkty pomiarowe dla analizowanych belek? Czy założenie położenia czujnika wybrane a priori jest zasadne z punktu widzenia możliwości wybrania węzła drgań?
5. Dlaczego przeprowadzono badania eksperymentalne tylko dla jednego punktu pomiarowego? Czy istnieją przesłanki, aby założyć, że zdolność tłumienia wibroizolacji jest niezależna od amplitudy drgań? W przypadku analizy dokonanej dla jednego punktu, wyniki uzyskamy dla jednej amplitudy. W zależności od postaci drgań, w innym punkcie dla tej samej częstotliwości amplituda może być większa lub mniejsza. Czy ma to wpływ na szacowanie parametrów związanych z właściwościami wibroizolacji?

Powyższe uwagi nie wpływają na ocenę merytoryczną pracy doktoranta. Pozostałe wyniki prac przedstawione są prawidłowo, a wszystkie wnioski odnoszą się bezpośrednio do rezultatów badań są sformułowane poprawnie. Postawione powyżej pytania mają charakter dyskusyjny, a ich celem jest wskazanie problemów, których można będzie uniknąć w przyszłych pracach badawczych.

## 5. Wnioski końcowe.

Rozprawa doktorska autorstwa mgra inż. Piotra Łabuńskiego dotyczy ważnego i aktualnego problemu badawczego w zakresie oceny efektywności materiałów wibroizolacyjnych.

Wyniki prac mogą znaleźć zastosowanie w praktyce co oprócz wartości naukowej stanowi o użytecznym charakterze badań. Praca zawiera istotne z punktu widzenia naukowego wnioski, poparte wynikami eksperymentów.

W mojej opinii, praca doktorska pt. **„Wpływ rodzaju materiału tłumiącego, temperatury pracy oraz geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji”** autorstwa mgra inż. Piotra Łabuńskiego spełnia warunki stawiane względem dysertacji doktorskiej, dla których wymagania określono w ustawie o stopniach i tytułach naukowych (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Dz.U. 2023 poz. 742).

Rozprawa może być dopuszczona do publicznej obrony i stanowić podstawę do nadania mgr. inż. Piotrowi Łabuńskiemu stopnia naukowego doktora nauk technicznych dyscyplinie inżynieria mechaniczna.