



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki

Kraków, dn. 30.08.2024 r.

### Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Romualda Kurasa pt: „Optymalizacja kształtu aktuatora piezoelektrycznego w aktywnej redukcji drgań struktur dwuwymiarowych” dla Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie

#### **1. Podstawa prawna**

Recenzję wykonano na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, Prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghadta z dn. 26 czerwca 2024 r. Recenzja została wykonana zgodnie z obowiązującymi przepisami zawartymi w Ustawie z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dziennik Ustaw z 2023 r. poz. 742. W rozdz. 2 Ustawy art. 186 napisano, że stopień naukowy doktora nadaje się osobie, która posiada tytuł zawodowy magistra inżyniera, posiada w dorobku co najmniej jeden artykuł naukowy oraz przedstawiła i obroniła rozprawę doktorską. Kandydat spełnia te warunki. W artykule 187 zaznaczono, że przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Dodatkowo rozprawa doktorska powinna prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W dalszej części tej recenzji przedstawiona jest ocena spełnienia wymienionych warunków przyznania stopnia naukowego doktora.

#### **2. Charakterystyka ogólna pracy**

Oceniana praca doktorska została wykonana w Katedrze Elektrotechniki i Podstaw Informatyki na Wydziale Elektrotechniki I Informatyki Politechniki Rzeszowskiej pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Adama Brańskiego a promotorem pomocniczym był Mariusz Borkowski, prof. PRz. Praca liczy łącznie 114 stron i jest napisana w języku polskim.

Ostatnie kilkadziesiąt lat przyniosło znaczący rozwój materiałów funkcjonalnych, których parametry oraz właściwości mogą ulegać zmianie pod wpływem działania bodźców zewnętrznych. Do najbardziej typowych oddziaływań zewnętrznych należą:

temperatura, zmiana natężenia i długości światła, pole elektryczne, pole magnetyczne. Bardzo często ich działanie związane jest z konstrukcjami cienkościennymi takimi jak belki, płyty, złożone elementy powierzchniowe, zawierające na powierzchni lub wewnątrz części nośnej czujniki, elementy wykonawcze i elementy układu sterowania czy zasilania. Początki konstrukcji inteligentnych związane były między innymi z zagadnieniami sterowania i tłumienia drgań mechanicznych dużych stacji orbitalnych, wyciszeniem dużych obiektów pływających oraz z monitorowaniem stanu konstrukcji lotniczych i budowlanych. Podstawy teoretyczne konstrukcji inteligentnych związane były z naukowcami Balasem i von Flotovem, a pierwsze eksperymenty potwierdzające możliwości aplikacyjne opisano w pracach Hubbarda i Baileya oraz Crowleya i de Luisa. Redukcję drgań z wykorzystaniem elementów piezoelektrycznych można również przeprowadzić na sposób pasywny poprzez dopięcie do elektrod elementu piezoelektrycznego odpowiednio dostrojonej impedancji elektrycznej, takie podejście zaprezentowali Von Flotow i Hagood w latach dziewięćdziesiątych. W kolejnych latach rozwijane były metody optymalizacyjne i algorytmy sterowania.

Praca doktorska Pana mgr. inż. Romualda Kurasa dobrze wpisuje się w opisane zagadnienia. W pracy podjęto istotny problem optymalizacji kształtu aktuatora piezoelektrycznego w aktywnej redukcji drgań na przykładzie struktur dwuwymiarowych.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, bibliografii obejmującej 97 pozycji, 69 rysunków, dziewięciu tabel oraz ze streszczenia w języku angielskim oraz w języku polskim, wykazu ważniejszych oznaczeń oraz spisów: treści, tabel i rysunków i trzech załączników.

We wstępie, po przeglądzie literatury, Autor uzasadnia podjęcie wybranej tematyki podkreślając celowość realizowanych badań analitycznych, doświadczalnych i numerycznych. W rozdziale tym Autor formułuje również cel pracy, tezę i hipotezę badawczą. Teza pracy zostaje sformułowana w postaci „jeśli znajdzie się odpowiedni kształt PZT i jego położenia na trójkątnej płycie, to zapewnia się maksymalną efektywność redukcji drgań”. Głównym obiektem badań jest wspomniana płyta trójkątna o wszystkich krawędziach swobodnie podpartych.

W rozdziale drugim Doktorant opisał opracowaną metodę analityczną redukcji drgań wymuszonych z masą przyłożoną w punkcie z oddziaływaniem aktuatora PZT. W rozdziale tym rozpatruje problem drgań własnych i wymuszonych. Rozpatrzone zostają modele symetryczne oraz asymetryczne, dla wymienionych modeli przeprowadzone są obliczenia redukcji drgań w stanie ustalonym z zastosowaniem regulatora LQR.

Rozdział trzeci pokazuje wkład doktoranta w rozwój aktywnej redukcji drgań. Zostaje w nim opisana redukcja drgań płyty trójkątnej. W rozdziale tym rozpatruje problem drgań własnych i wymuszonych działaniem aktuatora PZT. Doktorant opracowuje optymalne kształty piezoceramik PZT a następnie przeprowadza obliczenia analityczne dla pierwszych sześciu postaci drgań.

W rozdziale czwartym Doktorant opisał badania eksperymentalne weryfikujące skuteczność zaproponowanych kształtów piezoceramiki a-PZT na wielkość redukcji amplitudy drgań. Badania zostały zrealizowane dla stanu ustalonego przy zastosowaniu dwóch modeli PZT: s-PZT i z-PZT.

Podsumowanie wyników przeprowadzonych analiz i badań, dyskusję i dalsze kierunki badań Autor zawarł w rozdziale piątym kończącym merytoryczną część podjętego tematu.

### **3. Merytoryczna ocena pracy doktorskiej**

#### **3.1. Ocena układu rozprawy doktorskiej oraz wykorzystanego piśmiennictwa**

Oceniana rozprawa doktorska zawiera wszystkie niezbędne elementy składowe. W rozdziale pierwszym zawarto wprowadzenie do podjętej tematyki badawczej, opisano stan aktualnych badań o zbliżonej tematyce prowadzonych zarówno w ośrodkach krajowych jak i zagranicznych. Przedstawiono zarówno starsze podstawowe pozycje literaturowe jak prace zawierające najnowsze wyniki badań. W pierwszym rozdziale, po kwerendzie, Autor rozprawy opisał cel, tezę, hipotezy badawcze oraz obiekty badań.

W rozdziale drugim Autor rozprawy opisał zagadnienia związane z drganiami wymuszonymi belki z masą przyłożoną w punkcie, aktuatorem PZT i siłą wymuszającą przyłożoną w punkcie. W rozdziale drugim Autor opisuje problem drgań własnych modele jednowymiarowe PZT: symetryczne jak i asymetryczne, opisane są rozwiązana analityczne redukcji drgań przy zastosowaniu obu modeli PZT i regulatora LQR. Jest to bardzo istotny rozdział rozprawy doktorskiej ponieważ uzyskane wyniki obliczeń analityczny umożliwiają ich zastosowania dla płyty trójkątnej. Kolejne dwa są głównymi rozdziałami rozprawy doktorskiej. Obiektem badań jest płyta trójkątna, dla której Doktorant rozwiązuje problem drgań własnych i równania drgań wymuszonych. Opracowuje modele PZT i analitycznie rozwiązuje łączne oddziaływanie PZT – płyta trójkątna. Zaczynają od standardowych form (kwadratowa, kołowa) ceramiki PZT, a następnie uzyskuje kształty PZT umożliwiające maksymalną redukcję amplitudy drgań. Wnioski z obliczeń analitycznych zostały pozytywnie potwierdzone w badaniach eksperymentalnych (rozdział piąty). W tym rozdziale Doktorant

szczegółowo opisał wykorzystaną aparaturę oraz zaprojektowane i zrealizowane stanowiska badawcze oraz układ aktywnej redukcji drgań. Dalej omówione zostały wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych.

Całość została zakończona analizą wyników, podsumowaniem ze wskazanymi kierunkami dalszych badań. Dodatkowo Autor zamieścił w pracy spisy rysunków i tabel oraz wykaz ważniejszych oznaczeń. Układ i strukturę pracy oraz użyte piśmiennictwo mogę uznać w pełni za prawidłowe.

### **3.2. Ocena tezy i celu pracy**

Kandydat jako cel swojej pracy doktorskiej wskazał znalezienie kształtu aktuatora wykonanego z PZT i jego położenia na trójkątnej płycie, które zapewnią maksymalną efektywność redukcji drgań. Tak sformułowany cel pracy wpisuje się w tematykę związaną z aktualnymi zagadnieniami predykcji rozptywu energii w układach mechanicznych.

Autor podejmuje się opracowania autorskiej metody optymalizacji kształtu aktuatora piezoelektrycznego w aktywnej redukcji drgań na przykładzie struktur dwuwymiarowych. Badania naukowe obejmują rozważania teoretyczne, numeryczne i badania eksperymentalne. Zagadnienie redukcji drgań płyty trójkątnej wymaga umiejętności rozwiązywania wielu wzajemnie powiązanych problemów cząstkowych. Niezbędne jest rozwiązanie problemów wibracyjnych, planowania eksperymentów, przetwarzania sygnałów i budowy układów aktywnej redukcji drgań. Są to więc badania interdyscyplinarne. Jednocześnie otrzymane wyniki mają wyraźne przełożenie użytkowe. Pozwalają bowiem na znaczną redukcję parametrów wibracyjnych maszyn, urządzeń i pojazdów. Uważam, że podjęta problematyka jest istotna zarówno z naukowego punktu widzenia jak ze względu na wymierne wyniki użytkowe. Cel pracy jest w pełni uzasadniony potrzebami tych środowisk i pozwala na uzyskanie oryginalnych wyników naukowych.

### **3.3. Ocena wykorzystanych metod badawczych**

Kandydat w rozprawie doktorskiej wykorzystuje wszystkie metody badawcze: teoretyczne, numeryczne i doświadczalne. Wymaga to umiejętnego wykorzystania aparatu matematycznego, zaawansowanych technik pomiarowych, doboru odpowiednich aktuatorów drgań, układów konwersji analogowo-cyfrowej, konstrukcji i oprogramowania układów mikroprocesorowych realizujących algorytmy sterowania aktywnego. Wykorzystane przez Kandydata metody badawcze są interdyscyplinarne, wymagają bowiem wiedzy oraz biegłości z zakresie więcej niż jednej dyscypliny.

Uważam, że wybór oraz wykorzystanie metod badawczych są prawidłowe.

### **3.4. Ocena omówienia wyników badań oraz ich oryginalności**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Romualda Kurasa stanowi oryginalne opracowanie Autora. Przeprowadzone badania teoretyczne, numeryczne oraz doświadczalne pozwoliły potwierdzić hipotezę i udowodnić tezę pracy a tym samym na zrealizowanie celu pracy. Doktorant uzyskał oryginalne rozwiązanie problemu aktywnej redukcji drgań układów dwuwymiarowych.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć:

- Zaproponowanie uogólnienia modelu a-PZT umożliwiającego maksymalizację redukcji amplitudy drgań płyty trójkątnej i określenie położenia aktuatora PZT
- Opracowanie algorytmu optymalizującego kształt ceramiki PZT oraz jego położenie na strukturze płytowej.
- Wyprowadzenie wzorów numerycznych na bazie ilorazów różnicowych opisujących działanie PZT (w zależności od sumy momentów gnących).
- Zaprojektowanie oryginalnych stanowisk badawczych oraz realizację szeregu trudnych i czasochłonnych badań doświadczalnych.

Opracowaną i przedstawioną metodę optymalizacji kształtu i położenia aktuatorów PZT przy założonym modelu matematycznym w celu maksymalizacji efektywności redukcji drgań metodą aktywną oraz uzyskane wyniki badań doświadczalnych można uznać w pełni za oryginalny wkład Kandydata do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

### **3.5. Edytorska ocena pracy i uwagi dyskusyjne**

Rozprawa doktorska jest napisana bardzo starannie z niewielką liczbą błędów edytorskich:

- str. 39 rys. 2.15; str. 41. Rys 2.29, 2.20, zastosowana skala na osi rzędnych nie pozwala na stwierdzenie, czy odpowiednie wartości osiągają maksimum.
- Autor stosuje pojęcia: masa punktowa, siła punktowa raczej powinny one brzmieć siła przyłożona w punkcie, masa przyłożona w punkcie.
- Jaka jest niepewność pomiarów?
- Jaki jest sens fizyczny funkcji delta Diraca i funkcji skokowej Heaviside'a oraz ich pochodnych?

### **3.6. Ocena dotycząca ogólnej wiedzy Kandydata w dyscyplinie oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Analizując przedstawioną do oceny rozprawę doktorską można stwierdzić, że Kandydat umiejętnie korzysta z dostępnych badań w literaturze naukowej, dobiera

odpowiednie metody badawcze, prawidłowo jest stosuje i analizuje. Wyniki badań przedstawia w czytelny i przejrzysty i sposób. Uzyskane wyniki badań zostały opublikowane w czasopismach naukowych o uznanej renomie.

Kandydat opublikował wyniki swoich prac badawczych w renomowanych czasopismach takich jak „Archives of Acoustic”, „Vibrations in Physical Systems, „International Journal of Electronics and Telecommunications”. Na uwagę zasługuje fakt, że w 1 artykuł jest samodzielny i w jednym artykule jest pierwszym współautorem co wskazuje na jej wiodącą rolę w tych pracach. W 2022 roku otrzymał nagrodę III stopnia w konkursie imienia Marka Kwieka organizowanym przez Polskie Towarzystwo Akustyczne.

#### **4. Podsumowanie**

Opracowaną i przedstawioną metodę optymalizacji kształtu i położenia aktuatorów PZT przy założonym modelu matematycznym w celu maksymalizacji efektywności redukcji drgań metodą aktywną oraz uzyskane wyniki badań doświadczalnych można uznać w pełni za oryginalny wkład Kandydata do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Rozwiązane zagadnienia mogą zostać wykorzystane użytkownie i praktycznie.

Doktorant wykazał się umiejętnością poprawnego wyboru i sformułowania naukowego celu pracy. Następnie konsekwentnie, z dobrą znajomością zagadnienia, cel ten zrealizował. Pozwala to stwierdzić zdolność doktoranta do prowadzenia efektywnej, samodzielnej pracy naukowej. Stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony i **jednocześnie z uwagi na wysoki poziom naukowy, dotychczasowy dorobek publikacyjny wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**



*Prof. dr hab. inż. Jerzy Wiciak*

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie