

Kraków, 7 października 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Marek S. Kozień
Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki Stosowanej i Biomechaniki

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Romualda Kurasa
pt. „Optymalizacja kształtu aktuatora piezoelektrycznego
w aktywnej redukcji drgań struktur dwuwymiarowych”

1. Podstawa prawna

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Romualda Kurasa pt. „Optymalizacja kształtu aktuatora piezoelektrycznego w aktywnej redukcji drgań struktur dwuwymiarowych” została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej, Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, datowanego na dzień 26 czerwca 2024 r. (sygn. RM-530-03-02/2024) oraz właściwej przedmiotowej umowy.

2. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca została wydrukowana w formie zeszytu/broszury w formacie A4 i zawiera 114 numerowanych stron. Ponadto na początku zawiera 18 dodatkowo numerowanych stron (numeracja rzymska) obejmujących: stronę tytułową, podziękowania, streszczenie, abstract, spis treści, spis rysunków, spis tabel oraz wykaz ważniejszych oznaczeń.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” w podrozdziale „Wprowadzenie” omówiono trzy metody redukcji drgań układów mechanicznych: pasywne, semi-aktywne i aktywne ze szczególnym naciskiem na metody aktywne realizowane przy zastosowaniu elementów piezoelektrycznych. Następnie dokonano przeglądu literatury odnoszącego się do problemów aktywnej redukcji drgań przy wykorzystaniu elementów piezoelektrycznych odnosząc się w szczególności do zagadnień optymalizacji położenia i optymalizacji rozkładu

materiału piezoelektrycznego w problemach redukcji drgań struktur jedno- i dwuwymiarowych. W dalszej części określono, cel, tezę, hipotezę, obiekt badań i zakres pracy doktorskiej. W **rozdziale drugim** zatytułowanym „Redukcja drgań belki” na początku przedstawiono analityczny model drgającej belki Bernoulliego-Eulera z uwzględnieniem znajdującej się na niej masy skupionej i analitycznym zamodelowaniu aktuatorów PZT: symetrycznego (s-PZT) i asymetrycznego (a-PZT). Następnie analizowano zagadnienie drgań własnych i redukcji drgań w stanie ustalonym, a następnie układu z regulatorem LQR w stanie nieustalonym, mając na uwadze optymalizację położenia aktuatorów w realizacji symetrycznej i asymetrycznej. W **rozdziale trzecim** „Redukcja drgań płyty trójkątnej” przedstawiono model analityczny drgającej płyty cienkiej Kirchhoffa-Love’a z uwzględnieniem modelowania aktuatorów PZT w szczególności w odniesieniu do płyty swobodnie podpartej na wszystkich krawędziach o kształcie trójkąta prostokątnego, równoramiennego. Zagadnienie drgań własnych rozwiązano metodą superpozycji zaproponowanej przez D.J.Gormana. Następnie sformułowano rozwiązanie zagadnienia drgań wymuszonych w stanie ustalonym. Bazując na metodzie zastępowania oddziaływania elementu piezoelektrycznego przez stosowny układ sił uogólnionych zdefiniowano pojęcie aktuatora asymetrycznego (a-PZT) oraz aktuatorów symetrycznych o kształcie kwadratu (s-PZT) i koła (c-PZT). W przypadku asymetrycznych aktuatorów PZT optymalizacji może podlegać kształt i położenie, natomiast dla aktuatorów symetrycznych tylko kształt. Następnie przeanalizowano zagadnienie redukcji drgań w stanie ustalonym w przypadku zastosowania aktuatorów niesymetrycznych i symetrycznych. W **rozdziale czwartym** pt. „Eksperymentalna weryfikacja otrzymanych kształtów a-PZT dla płyty trójkątnej” przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w zakresie weryfikacji kształtów asymetrycznych aktuatorów PZT otrzymanych na drodze analiz teoretycznych omówionych w rozdziale trzecim oraz porównania efektywności ich zastosowania z efektywnością zastosowania aktuatorów symetrycznych (s-PZT i c-PZT). W tym celu zbudowano dedykowane stanowisko badawcze, wykonano aktuatorów odpowiednich kształtów i zbudowano stosowny układ aktywnej redukcji drgań ze sprzężeniem zwrotnym. Rozdział piąty pt. „Zakończenie, wnioski, kierunki dalszych badań” jest rozdziałem zamykającym pracę doktorską. Tekst pracy uzupełniony jest jeszcze bibliografią obejmującą 97 pozycji oraz trzema dodatkami z tekstami skryptów służących do obliczania częstości drgań własnych i określających postacie drgań

3. Ocena pracy

3.1 Ocena ogólna

Praca doktorska dotyczy zagadnienia redukcji drgań giętnych belek i płyt przy wykorzystaniu elementów piezoelektrycznych. Zagadnienie to było i jest przedmiotem analiz prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych od wielu dziesięcioleci. Jednak tematyka badawcza rozważana w ramach doktoratu jest oryginalna. Pierwszą cechą oryginalności jest wprowadzenie pojęcia aktuatora asymetrycznego PZT, którego realizacja praktyczna wiąże się z odpowiednim doбором jego kształtu. W pracy rozważono zarówno aktuator asymetryczny stosowany do redukcji drgań giętnych belki (jednowymiarowy) jak również aktuator asymetryczny mający zastosowanie do redukcji drgań giętnych płyty (dwuwymiarowy). W przypadku analiz prowadzących do doboru aktuatora, w przypadku aktuatorów asymetrycznych pojawia się oprócz zagadnienia optymalizacji jego położenia również problem optymalizacji (doboru) jego kształtu. Drugim oryginalnym zagadnieniem rozważanym w pracy jest analiza drgań giętnych własnych i wymuszonych giętnych belki z masą skupioną, obciążonej układem sił uogólnionych modelujących oddziaływanie aktuatorów PZT. Trzecim oryginalnym zagadnieniem rozwijanym w pracy jest problem drgań własnych i wymuszonych płyty o kształcie trójkąta z uwzględnieniem wymuszenia zewnętrznego w postaci sił uogólnionych modelujących oddziaływanie aktuatorów PZT. W tym celu zaimplementowano metodę superpozycji Gormana. W obydwu przypadkach (dla belki i płyty) do opisu oddziaływania elementów piezoelektrycznych i działania masy skupionej w sformułowaniu analitycznym wykorzystano funkcję Heaviside'a, dystrybucję δ -Diraca i pochodną dystrybucji δ -Diraca. Wykonane prace obejmowały zbudowanie modelu teoretycznego służącego do opisu zagadnienia drgań belki i płyty trójkątnej oraz przeprowadzenie analiz drgań własnych i wymuszonych. W dalszej części w celu realizacji celu pracy zdefiniowano odpowiednie aktulatory asymetryczne i przeprowadzono szereg analiz symulacyjnych dotyczących zagadnienia aktywnej redukcji drgań giętnych wraz z optymalizacją użycia aktuatorów asymetrycznych (kształt, położenie). Efektywność redukcji drgań porównano z efektywnością uzyskaną również dla optymalnego zastosowania elementów symetrycznych pokazując jej zwiększenie. Rozważono zagadnienie aktywnej redukcji drgań giętnych przez elementy piezoelektryczne. Na koniec, co jest godne podkreślenia zbudowano dedykowane laboratoryjne stanowisko badawcze do analizy zagadnienia aktywnej redukcji drgań giętnych płyty trójkątnej. Przeprowadzono badania doświadczalne dla wykonanych elementów PZT, zgodnie z wcześniej przeprowadzonymi

analizami symulacyjnym dla aktuatorów symetrycznych i asymetrycznych. Wyniki badań potwierdziły wyniki symulacji numerycznych, co potwierdza poprawność modelowania. Ponadto wyniki symulacji oraz badań doświadczalnych potwierdziły postawioną tezę pracy.

Praca napisana jest bardzo czytelnie i zrozumiale. Podział na rozdziały jest naturalny. Dobór wykresów i ich jakość jest bardzo dobra. Umiejętnie wykorzystane są kolory do prezentacji danych na wykresach. Należy podkreślić wyjątkową staranność edycji tekstu, co jest jeszcze wzmocnione przez sposób wydania pracy.

3.2 Uwagi o charakterze merytorycznym

Do uwag o charakterze merytorycznym, które nie wpływają na poprawność dokonanych analiz zaliczyć należy:

1) Strona 17.

Według Autora model belki Bernoulliego-Eulera „pomija obrót przekroju poprzecznego belki”. Natomiast założenie Bernoulliego-Eulera mówi o płaskości przekroju i jego prostopadłości do odkształconej osi belki.

2) Strona 17.

Jednostka obciążenia zewnętrznego belki, nazywanego w pracy „siłami wymuszającymi” to $[N/m]$, a nie jak podano $[N]$.

3) Strona 47.

Jednostka obciążenia zewnętrznego płyty, nazywanego w pracy „siłami zewnętrznymi” to $[N/m^2]$, a nie jak podano $[N]$.

3.3 Uwagi redakcyjne

Do uwag o charakterze redakcyjnym zaliczyć należy:

1) Strony 1-2.

W tekście pracy o charakterze naukowym należy unikać zbyt uproszczonych sformułowań odnoszących się do zagadnień z dyscypliny naukowej którą praca obejmuje: „każdy pojazd...jest generatorem częstotliwości”, „do kategorii urządzeń pasywnych, można zaliczyć np. eliminatory drgań”, „taki mechanizm może pochlaniać drgania”.

2) Strona 17.

Nieprecyzyjne sformułowanie: „równanie drgań wymuszonych belki...jest modelem Eulera-Bernoulliego”. Z założeń Bernoulliego-Eulera wynika określona postać równania.

3) Strona 18.

Sformułowanie „po rozdzieleniu zmiennych, równanie (2.1) można zapisać w postaci dwóch równań: jedno jest związane z warunkami brzegowymi i dotyczy stanu ustalonego, drugie zawiera w sobie zmienną niezależną t i uwzględnia wpływ warunków początkowych” jest bardzo nieprecyzyjne. Sensem procedury rozdziału zmiennych jest zastąpienie równania różniczkowego cząstkowego (2.1) układem dwóch równań różniczkowych zwyczajnych (o zmiennych niezależnych odpowiednio x oraz t).

4) Strona 25.

Zamiast „drgania symetryczne” raczej „symetryczne formy/postacie/mody drgań”.

5) Strona 29.

Zamiast „waga masy skupionej” lepiej „wartość masy skupionej”.

6) Cały tekst.

Autor ma tendencje do prezentowania wartości wyników obliczeń numerycznych podając wartości wielu miejsc dziesiętnych (np. str. str. 30, 39, 43, 53). Nie ma to uzasadnienia, a sugeruje podawanie wartości dokładnych. Taki sposób prezentacji utrudnia też porównywanie wartości pomiędzy sobą.

4. Podsumowanie, wniosek końcowy

Recenzowana praca:

- Dotyczy oryginalnego i interesującego problemu badawczego, jakim jest dobór (optymalizacja) kształtu aktuatora piezoelektrycznego stosowanego do aktywnej redukcji drgań giętnych płyt. Jako obiekt badań wybrano niełatwy do modelowania obiekt którym jest płyta trójkątna. Kształt poszczególnych postaci drgań własnych pozwala na rozważania dotyczące optymalnego kształtu aktuatorów. Ponadto w modelowaniu uwzględniono możliwość zastosowania aktuatorów asymetrycznych, czyli takich dla których wartości sił uogólnionych na przeciwległych krawędziach elementu są różne. Pomocniczo rozważono również zastosowanie (dobór kształtu) dla aktuatorów jednowymiarowych.
- Zawiera wyniki analiz opartych na modelu analitycznym wykorzystującym teorie belek Bernoulliego-Eulera (dla elementów jednowymiarowych) i teorii płyt Kirchhoffa-Love'a (dla elementów dwuwymiarowych) oraz zastąpienie oddziaływania elementu piezoelektrycznego przez odpowiedni układ sił uogólnionych przyłożonych do belki lub płyty w miejscach (obszarach) krawędzi elementu piezoelektrycznego. W opisie

analitycznym wykorzystano funkcje Heaviside'a oraz dystrybucję δ -Diraca i jej pochodną. Do znajdowania wartości częstości drgań własnych i postaci drgań własnych napisane zostały dedykowane skrypty.

- Uwzględnia w analizach efektywności redukcji drgań wyniki analiz optymalizacyjnych jednoparametrowej (dla belki - położenie środka elementu dla symetrycznego PZT) i dwuparametrowej (dla płyty - asymetria ramion par sił i położenie środka elementu dla asymetrycznego PZT). Analizy redukcji drgań były prowadzone zarówno w stanie ustalonym jak i z regulatorem LQR w stanie nieustalonym (przejściowym).
- Zawiera wyniki i analizy badań doświadczalnych dotyczącym aktywnej redukcji drgań płyty trójkątnej. Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i wykonane przez Doktoranta. Do badań użyte zostały specjalnie wykonane aktuatory typu a-PZT, s-PZT i c-PZT. Geometria płyt i materiał (własności materiałowe) oraz warunki brzegowe (ważna podkreślenia jest realizacja praktyczna warunku typu swobodnego podparcia dla płyty) były dobrane tak, aby możliwa była doświadczalna weryfikacja modeli analitycznych wykorzystywanych wcześniej w symulacjach komputerowych. Układ aktywnej redukcji drgań był układem ze sprzężeniem zwrotnym i regulatorem PI. Regulator został zaimplementowany w języku C z wykorzystaniem biblioteki FastPID.
- Zawiera systematycznie przeprowadzoną analizę dyskusję uzyskanych wyników, w szczególności w odniesieniu do założonych celów pracy, zakończoną sformułowaniem dziesięciu wniosków końcowych, Ponadto zawiera też przedstawione kierunki dalszych prac dotyczących rozważanych zagadnień.
- Zawiera niewielkie uchybienia, omówione w szczególności w punkcie 3.2, zasadniczo odnoszące się do użytych sformułowań, które w żadnym stopniu nie wpływają na poprawność samej analizy oraz przedstawione wnioski.

Zdaniem recenzenta przedstawiona praca jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora oryginalnego problemu naukowego, jakim była optymalizacja kształtu aktuatora PZT do aktywnej redukcji drgań docelowo struktur dwuwymiarowych (płyt). Oryginalna jest koncepcja aktuatora asymetrycznego. Z jego wykorzystaniem wiąże się problem optymalizacji położenia na płycie oraz optymalizacji jego kształtu (ramion) w celu uzyskania odpowiedniego efektu redukcji drgań. Sama realizacja tematu pokazała umiejętność Doktoranta do modelowania analitycznego zagadnień drgań układów ciągłych oraz sterowania drganiami. Doktorant wykazał się również umiejętnością przeprowadzenia

symulacji komputerowej w szerokim zakresie (zagadnienie drgań własnych, zagadnienie drgań wymuszonych, sterowanie drganiami) oraz odpowiedniego formułowania zagadnień optymalizacji. Doktorant wykazał się również umiejętnością zaprojektowania i wykonania wymaganego stanowiska do badań doświadczalnych (w tym zbudowania toru pomiarowego) oraz przeprowadzenia samych badań mających charakter realizacji aktywnej redukcji drgań. Godna podkreślenia jest umiejętność stosowania przez Doktoranta specjalistycznego oprogramowania komputerowego, w szczególności umiejętność pisania programów w języku C, czy też wykorzystywania oprogramowania MATLAB do akwizycji danych pomiarowych. Z realizacją pracy związane jest bezpośrednio opublikowanie czterech artykułów w czasopismach naukowych (Archives of Acoustics – dwa teksty, Vibrations in Physical Systems, International Journal of Electronics and Telecommunications). Wszystkie te działania pokazują umiejętność prowadzenia przez Doktoranta samodzielnej pracy naukowej. Spełnione są również wymagania art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r., poz. 574 ze zm.). Dlatego też wnoszę o dopuszczenie Pana mgr.inż. Romualda Kurasa do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

Ponadto biorąc pod uwagę sformułowanie zagadnienia, jego zakres, całościowy sposób realizacji, opublikowanie związanych z dysertacją artykułów w czasopismach naukowych, wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr.inż. Romualda Kurasa, o ile Rada naukowa dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej posiada takie prerogatywy i są spełnione ewentualne inne wymogi.



