

Kraków, 30 września 2023 r.

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

Recenzja **rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mateusza Żurawskiego** **pt. „Experimental Study, Numerical Analysis and Predictive** **Control of the Adaptive Tuned Particle Impact Damper”**

1. Podstawa prawna

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mateusza Żurawskiego pt. „Experimental Study, Numerical Analysis and Predictive Control of the Adaptive Tuned Particle Impact Damper” została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, datowanego na dzień 06 lipca 2023 r. (RND/M.521.33.2023) oraz właściwej przedmiotowej umowy.

2. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca zawiera 180 stron i została napisana w języku angielskim. W zakresie merytorycznym obejmuje pięć rozdziałów i spis literatury. Praca uzupełniona jest streszczeniami w języku angielskim i polskim, spisem treści, wykazem stosowanych skrótów oraz wykazem oznaczeń.

W **rozdziale pierwszym** zatytułowanym „Introduction” przedstawiono uzasadnienie wybranej tematyki pracy („Motivation”), a następnie dokonano przeglądu literatury dotyczącej tłumików uderzeniowych drgań (PID). Omówiono rodzaje tłumików oraz dokonano ich klasyfikacji. Następnie przedstawiono wybrane znane w literaturze praktyczne zastosowania tłumików. Rozdział zakończony jest przedstawieniem celów realizacji pracy doktorskiej oraz jej zakresu. Kolejne trzy rozdziały mają charakter zasadniczy dla pracy doktorskiej. W **rozdziale drugim** zatytułowanym „Adaptive tuned particle impact damper – the prototype and experimental studies” omówiono zbudowane stanowisko badawcze obejmujące belkę wspornikową z układem do wymuszania drgań ruchem jej końca

utwierdzonego (wymuszenie kinematyczne) poprzez dedykowany mimośrodowy układ pobudzany przez ruch wału silnika, pozwalający na uzyskanie różnych amplitud przemieszczeń końca belki oraz umieszczony na drugim - swobodnym końcu belki, wykonany własny jednomasowy tłumik uderzeniowy o pięciu opcjonalnych długościach (wysokościach) komory i pięciu stosowanych kulach o różnych masach wraz ze stosownym układem pomiarowym drgań obejmującym bezkontaktowy czujnik laserowy, akcelerometr i kartę pomiarową do komputera. W pomiarach wykorzystywano oprogramowanie LabVIEW. W dalszej części rozdziału omówiono rezultaty pomiaru drgań końca belki wymuszanej jej odkształceniem wstępnym (drgania własne tłumione) oraz wymuszanej przemieszczeniem jej końca (drgania wymuszone kinematycznie, ruch podłoża o charakterze harmonicznym). Uzyskane rezultaty badań doświadczalnych pokazały skuteczność zaprojektowanego tłumika i były dalej stosowane do walidacji zbudowanych modeli teoretycznych. W **rozdziale trzecim** „Adaptive tuned particle impact damper – numerical analysis” omówiono stosowne modele kontaktu kulki tłumika uderzeniowego z jego ścianami (kontakt typu „soft” i „rigid”), następnie zbudowano model analityczny tłumika, dokonano jego walidacji z wynikami uzyskanymi w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych, a następnie dokonano szeregu symulacji skuteczności działania tłumika w oparciu o przeprowadzone odrębnie dla każdego czynnika systematyczne analizy wpływu długości komory tłumika (wysokości tłumika), masy stosowanej kuli i amplitudy wymuszenia. W **rozdziale czwartym** „ATPID damper algorithm” przedstawiono oryginalną własną koncepcję układu sterującego długością komory tłumika uderzeniowego. Rozważono przy tym dwie koncepcje układu: algorytm wykorzystujący zapisane wcześniej w bazie dyskretne wartości długości komory dla zadanych wartości mas i amplitud drgań i zaproponowany predykcyjny algorytm sterowania. Ostatni **rozdział piąty** zawiera podsumowanie pracy. Podane zostały wnioski i spostrzeżenia wynikające z realizacji pracy doktorskiej oraz podane zostały jej osiągnięcia w obszarze badań doświadczalnych tłumika uderzeniowego, w obszarze symulacji pracy tłumika w tym budowy modelu analitycznego oraz w obszarze sterowania długością komory tłumika w szczególności w odniesieniu do algorytmów sterowania.

3. Ocena pracy

3.1 Ocena ogólna

Praca doktorska dotyczy zagadnienia analizy celowości i sposobu praktycznej realizacji koncepcji rozwojowej tłumika uderzeniowego, polegającej na możliwości zmiany długości

komory w której porusza się pojedyncza kula (bądź w szerszej aplikacji objętości komory z granulatem) w celu zwiększenia jego skuteczności do redukcji drgań. Rozważany pomysł polega na realizacji tłumika z ruchomą obudową (dnem, ścianą), której ruch sterowany jest docelowo przy wykorzystaniu predykcyjnego układu sterowania. Badania doświadczalne i symulacje komputerowe prowadzone są na przykładzie belki wspornikowej, która może być pobudzana do drgań przez ruch utwierdzenia (wymuszenie kinematyczne), w pracy mające charakter funkcji harmoniczej o częstotliwości związanej z podstawową formą drgań własnych belki. Doktorant postawił trzy zasadnicze cele pracy doktorskiej, które są uporządkowane i wyznaczają ścieżkę postępowania. Mgr inż. Mateusz Żurawski cele te konsekwentnie realizował w trakcie realizacji pracy, co finalnie doprowadziło do pokazania możliwości konstrukcji oraz wykazało skuteczność stosowania tłumików uderzeniowych o zmiennej długości komory (o zmiennej objętości komory), w których położenie ścianki (denka) jest sterowane zaproponowanym algorytmem predykcyjnym. **Pierwszy cel pracy** dotyczył zbudowania tłumika uderzeniowego realizującego zaproponowaną i nowatorską koncepcję zmienności objętości jego komory. Do realizacji praktycznej Doktorant wybrał koncepcję tłumika „jednowymiarowego” o zmiennej długości komory, realizowanej poprzez ruch jednej z jego ścianek (denek), w którym może poruszać się kula o dobieranej masie. Koncepcja ta jest słuszna w powiązaniu z wyborem belki jako układu, którego drgania są zmniejszane w zakresie pierwszej (podstawowej) formy drgań. Jest to również sformułowanie zagadnienia o wystarczającym stopniu ogólności z punktu widzenia sprawdzenia koncepcji, jak też i wymogów stawianych pracom doktorskim. Tłumik został wykonany i zamocowany na końcu swobodnym belki. Doktorant zbudował laboratoryjne stanowisko badawcze, którego istotnym elementem była realizacja wymuszenia kinematycznego utwierdzonego końca belki poprzez specjalnie skonstruowany układ typu mimośrodowego napędzany wałem silnika elektrycznego wraz z zasilaczem i sterownikiem czasu rzeczywistego. Istotnym elementem stanowiska badawczego jest tor pomiarowy w którego skład wchodzi bezkontaktowy czujnik laserowy oraz akcelerometr i karta pomiarowa. W procesie akwizycji i sterowania używany był program LabVIEW. Przy wykorzystaniu wspomnianego stanowiska badawczego wykonano ponad sto serii pomiarowych obrazujących zdolności do redukcji drgań belki przez tłumik przy jej drganiach własnych (wymuszenie odkształceniem wstępnym belki) oraz drganiach wymuszonych o harmonicznie zmiennym kinematycznym wymuszeniu drgań końca belki o różnych wartościach amplitudy tych drgań. Rezultaty badań przeprowadzonych dla pięciu różnych długości komory i pięciu wartości masy kuli pokazały

zdolność do redukcji drgań wykonanego tłumika, ukazały różnice stopnia redukcji dla różnych wartości mas i długości oraz stały się bazą danych do weryfikacji poprawności modelu analitycznego tłumika zbudowanego w ramach realizacji kolejnego celu pracy doktorskiej. **Drugi cel pracy** dotyczył zbudowania modelu analitycznego układu tłumika uderzeniowego wraz z drgającą belką. Zasadniczym rozwiązaniem przez Doktoranta problemem był opis modelu opisu kontaktu kulki ze ścianą (obecność dwóch ścian, jednostronne ograniczenie odkształceniowo/przemieszczeniowe w obszarze kontaktu, model kontaktu). Zastosowany został model miękkiego kontaktu, bazujący na teorii Herza z uwzględnieniem tłumienia wiskotycznego. Belka została zastąpiona układem zastępczym o jednym stopniu swobody. Model został następnie pozytywnie zwalidowany mając na uwadze wyniki z przeprowadzonych wcześniej badań doświadczalnych. W dalszej części badań przeprowadzono szczegółową analizę istotności wpływu długości komory, masy kulki oraz amplitudy wymuszenia zewnętrznego na skuteczność redukcji drgań przez rozważany tłumik uderzeniowy. Wpływ każdego z czynników analizowany był odrębnie. Przeprowadzono również analizę energetyczną w celu lepszego zrozumienia zjawisk fizycznych zachodzących w trakcie pracy tłumika. Na koniec sformułowano zagadnienie optymalizacji prowadzące do określenia wartości wysokości tłumika przy zadanej sekwencji wartości mas kulki i amplitud wymuszenia w celu zminimalizowania wartości maksymalnej przemieszczenia masy modelującej belkę (kryterium optymalizacji). Uzyskane wartości były podstawą do wykonania tłumika i eksperymentalnej weryfikacji jego działania na laboratoryjnym stanowisku pomiarowym. Uzyskano sprawność redukcji drgań o wartości około 90%. **Trzecim celem pracy** było opracowanie algorytmu sterowania o charakterze predykcyjnym do doboru optymalnej długości komory tłumika w zależności od różnych (zmiennych) amplitud wymuszenia. W realizacji praktycznej sterowaniu podlega położenie jednego z denek komory tłumika realizowane przy użyciu silnika elektrycznego. Finalnie sformułowano algorytm sterowania predykcyjnego, który umożliwi szybkie wyznaczenie optymalnej wysokości przepustnic tłumika dla dowolnych parametrów drgań układu.

Praca napisana jest bardzo czytelnie i zrozumiale. Poszczególne istotne rozdziały związane są z realizacją kolejnych sformułowanych celów pracy. Należy podkreślić wyjątkową staranność edycji tekstu.

3.2 Uwagi o charakterze merytorycznym

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

1) Strona 35.

W sformułowaniu celów pracy Doktorant podaje „proposing a numerical model of the ATPID damper”. W sformułowaniu celu powinno być „modelu analitycznego”, ewentualnie „modelu teoretycznego”. Sam „model numeryczny” jest wtórny (następuje po budowie modelu analitycznego), służy uzyskaniu rozwiązania problemu i może być różnie zbudowany.

2) Strona 44 i dalsze.

Autor używa pojęcie „harmonic vibrations” obok pojęcia „free vibrations” opisując rodzaj drgań belki występujących podczas badań laboratoryjnych. Zamiast określenia „harmonic vibrations” w przyjętej klasyfikacji powinno być użyte sformułowanie „excited vibrations”. Pojęcie „harmonic” odnosi się do typu zmienności przebiegu funkcji (sygnału) w czasie, tak jak „kinematic” odnosi się do typu generowanego wymuszenia (wymuszenie przemieszczeniowe). Użycie określenia „free vibrations” jest poprawne.

3) Strona 71.

Doktorant komentując współczynnik restytucji podaje: „the coefficient of restitution are influenced by various factors, such as the material properties (e.g. elastic modulus and rheology), the angle of impact”. „Rheology” nie jest w parametrem opisującym własność materiałową. Definicja współczynnika restytucji (sposób wyznaczenia) nie zależy od tego czy zderzenie jest centralne. Co oznacza „angle of impact”?

4) Strona 77.

Doktorant komentując obszar zastosowań metody elementów skończonych podaje: „FEM is commonly used to model continuous materials that can be described by continuum mechanics, such as metals and plastics”. Nie ma pojęcia „continuous materials”. Nie ma też pojęcia mechaniki ciągłej. Mówi się natomiast o mechanice ośrodków ciągłych, dla których przyjmuje się założenie (aksjomat) ciągłości materiału („material continuity”).

5) Strony 93-97.

W analizach (symulacjach) dotyczących analizy zjawisk zachodzących w trakcie pracy tłumika, przyjmowane są wartości wysokości tłumika h_{max} sięgającej 0.8 m. Wartość ta jest duża. Czy sensem analiz było zwrócenie uwagi na możliwość wystąpienia określonego zjawiska (sposobu ruchu kuli) w symulacjach?

3.3 Uwagi redakcyjne

Do uwag o charakterze redakcyjnym zaliczyć należy:

1) Strona 36.

Zamiast „various kinetic excitations” powinno być „various kinematic type excitations”.

2) Strona 43.

Nieprecyzyjne sformułowanie: „experimental measurements will be performed for various types of parameters of the excitations”.

3) Strona 56.

Określenie „during the initial phase of vibrations” może powodować skojarzenie z kątem przesunięcia fazowego (np. odpowiedzi względem wymuszenia).

4) Forma osobowa.

Bardzo rzadko, ale jest stosowana forma osobowa: „I can examine” (str.72), „further, I present” (str.105), „I omit the fact” (str.122).

5) Strony 5, 82 i inne.

Na określenie ścian tłumika w które uderza kula używane są określenia sufit (ceiling) i podłoga (floor). Określenia te związane są używane w architekturze. Lepiej użyć pojęcia „denka” (tłumika, komory).

6) Strona 85 i inne.

Na określenie pojedynczej kuli która występuje w tłumiku używane jest w pracy określenie „grain”. Określenie to nie jest zbyt dobre dla pojedynczej użytej w tłumiku kuli. Przede wszystkim sugeruje jej małą masę.

4. Podsumowanie, wniosek końcowy

Recenzowana praca:

- Dotyczy oryginalnego problemu badawczego, jakim jest ocena wpływu długości komory tłumika uderzeniowego drgań na skuteczność redukcji drgań. Sformułowany problem ma charakter oryginalny i unikatowy. Zaproponowano formę realizacji sterowania, a w szczególności oryginalny elektromechaniczny układ sterowania obejmujący innowacyjny element sterujący oraz dedykowany algorytm sterowania.
- Zawiera wyniki i analizy badań doświadczalnych przeprowadzonych na zbudowanym laboratoryjnym stanowisku badawczym. Badania te były prowadzone w trakcie realizacji pracy w celu:

- oceny wpływu parametrów (wysokość tłumika, masa kuli, amplituda wymuszenia) na stopień redukcji drgań belki (oszacowania wstępnych charakterystyk tłumika),
- walidacji zbudowanego modelu analitycznego do symulacji dynamicznej układu,
- sprawdzenia skuteczności redukcji drgań belki dla wyznaczonych optymalnych wartości parametrów tłumika dynamicznego,
- sprawdzenia możliwości aplikacji algorytmu predykcyjnego sterowania wysokością tłumika i algorytmu wykorzystującego pochodzące z wcześniejszych analiz i zapisane w bazie danych dyskretne wartości długości komory dla zadanych wartości mas i amplitud drgań.

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i wykonane przez Doktoranta. W procesie analizy i sterowania wykorzystywane było oprogramowanie LabVIEW. Pokazało to umiejętność planowania i wykonywania badań doświadczalnych.

Elementy wykorzystywanego w badaniach prototypu tłumika były wykonywane przy użyciu drukarki 3D. Pokazało to wiedzę i umiejętności Doktoranta do wykorzystywania oprogramowania CAD, a w szczególności zapisania kodu poleceń dla urządzeń CNC (G-code) przy wykorzystaniu oprogramowania Cura.

- Zawiera wyniki przeprowadzonych w szerokim zakresie symulacji komputerowych dotyczących skuteczności działania tłumika w zakresie jednomodalnym, a w szczególności sprawdzenia koncepcji zwiększenia efektywności działania tłumika przy wykorzystaniu koncepcji zmiennej długości jego komory. Przeprowadzenie symulacji wymagało zbudowania modelu zastępczego i jego walidacji. Pokazana została umiejętność Doktoranta do znajdowania rozwiązań problemu przy wykorzystaniu metod: Rosenbrock Runge-Kutta (rzędu 3/4), Cash-Karp Runge-Kutta (rzędu 4/5), Fehlberg Runge-Kutta (rzędu 4/5) i solvera Livermore dla równań różniczkowych zwyczajnych. Szereg obliczeń zostało wykonanych przy wykorzystaniu programu do analiz symbolicznych Maple.
- Zawiera analizy dotyczące rozwiązania zagadnienia sterowania przepustnicy tłumika (zmiany długości komory). W szczególności sformułowano zagadnienie optymalnego tłumienia oraz sformułowano algorytm sterowania predykcyjnego wysokością przepustnic (długością komory) tłumika.
- Zawiera niewielkie uchybienia, omówione w szczególności w punkcie 3.2, które w żadnym stopniu nie wpływają jednak na poprawność samej analizy oraz przedstawione wnioski.

Zdaniem recenzenta przedstawiona praca jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora oryginalnego problemu naukowego, jakim była ocena wpływu wysokości (długości komory) tłumika uderzeniowego drgań na skuteczność redukcji drgań układu. Oryginalnym jest sama koncepcja tłumika uderzeniowego o zmiennej długości komory, ale również sposób praktycznej realizacji sterowania jednym z denek komory, realizacja elektromechanicznego układu sterowania i opracowanie algorytmu predykcyjnego sterowania układem. Wymagało to na początku prac wykonania krytycznego i twórczego przeglądu literatury przedmiotu. Doktorant wykazał się umiejętnością zaprojektowania wymaganego stanowiska do badań doświadczalnych, umiejętnością, wykonania toru pomiarowego, wykonania elementów mechanicznych metodą druku 3D oraz dogłębnej analizy wyników badań. Doktorant posiada również umiejętność budowy modeli teoretycznych mechaniki, przeprowadzania symulacji komputerowych oraz budowy i implementacji algorytmów sterowania. Godna podkreślenia jest umiejętność stosowania przez Doktoranta specjalistycznego oprogramowania komputerowego dotyczącego różnych obszarów - LabVIEW (pomiar, analiza i sterowanie drganiami), Maple (analiza symboliczna), Cura (sterowanie obrabiarkami CNC). Z realizacją pracy związane jest bezpośrednio opublikowanie pięciu artykułów w renomowanych czasopismach naukowych (Journal of Sound and Vibration, Materials-MDPI, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Acta Physica Polonica, Applied Sciences-MDPI) oraz wygłoszenie pięciu referatów na międzynarodowych konferencjach i seminariach naukowych. 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. Mateusza Żurawskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

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

