

Lublin 15.09.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. MATEUSZA ŻURAWSKIEGO

zatytułowanej:

Experimental Study, Numerical Analysis and Predictive Control of the Adaptive Tuned Particle Impact Damper

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawą formalną do opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Politechniki Warszawskiej z dnia 06.07.2023 roku.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została napisana pod opieką naukową Prof. dr hab. inż. Roberta Zalewskiego oraz promotora pomocniczego dr inż. Cezarego Graczykowskiego. Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej mieści się w dziedzinie nauk technicznych oraz dyscyplinie **inżynieria mechaniczna**.

2. CHARAKTERYSTYKA I OCENA AKTUALNOŚCI TEMATU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Żurawskiego dotyczy zaproponowania nowej koncepcji adaptacyjnego tłumika uderzeniowego oraz jej analiza pod kątem tłumienia drgań mechanicznych. Zaproponowana koncepcja polegała na modyfikacji klasycznego tłumika uderzeniowego o dodatkowy element elektromechaniczny, który umożliwiał zmianę objętości tłumika. Doktorant podjął się analizy bardzo trudnego zagadnienia, które wymagało od niego zaawansowanej wiedzy z teorii plastyczności, sprężystości, teorii drgań, mechatroniki.

Uważam, że proponowana tematyka rozprawy doktorskiej jest interesująca i ważna, gdyż problem redukcji drgań jest kluczowy w wielu aplikacjach inżynierskich, w których mogą występować strefy niebezpiecznych drgań prowadzące do osłabienia lub nawet

zniszczenia całej konstrukcji. Z tego względu, aspekt projektowania różnych konstrukcji tłumików drgań jest kluczowy i analizowany przez wiele ośrodków naukowych.

W rozprawie doktorskiej z powodzeniem podjęto próbę dokładnego opisu poszczególnych etapów konstruowania adaptacyjnego tłumika uderzeniowego. Skonstruowano prototyp tłumika oraz zbudowano stanowisko badawcze składające się z belki wspornikowej wraz z tłumkiem adaptacyjnym do analizy drgań swobodnych i wymuszonych.

Doktorant w swych badaniach stosuje dodatkowy element elektromechaniczny w postaci silnika elektrycznego, który ma za zadanie zmieniać położenie pojemnika tłumika co finalnie prowadzi do zmiany jego objętości w czasie rzeczywistym. Proponowana konstrukcja wyposażona jest w układ pomiarowy, co pozwala na dostosowanie się do aktualnych parametrów wymuszenia. Warto zaznaczyć, że takie rozwiązanie jest nowatorskie i może znacznie podnieść efektywność redukcji drgań, co potwierdziły wyniki uzyskane w rozprawie.

W pracy położono nacisk na badania doświadczalne oraz badania symulacyjne polegających na zaproponowaniu modelu numerycznego uderzeniowego tłumika drgań oraz jego dokładna analiza w tym analiza procesu zderzeń granulatu z pojemnikiem tłumika. W pracy Doktorant podjął się przeprowadzenia optymalizacji parametrycznej w celu zwiększenia efektywności redukcji drgań. Ważnym elementem rozprawy jest problem sterowania predykcyjnego polegająca na doborze odpowiedniej wysokości komory tłumika. Zastosowanie sterowanych tłumików umożliwia aplikację strategii sterowania wg. idei sky-hook lub ground-hook.

Proponowana koncepcja uderzeniowego ma duży potencjał praktycznych zastosowań w różnych branżach takich jak lotnicza, motoryzacyjna czy branża odzyskiwania energii elektrycznej o czym wspominał w rozprawie Doktorant.

Dlatego, wybrana tematyka badawcza jest zasadna z punktu naukowego i poznawczego. Uważam, że temat rozprawy doktorskiej jest aktualny pod względem użytecznym jak i naukowym.

3. OPIS ZAWARTOŚCI ROZPRAWY

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim i składa się z pięciu rozdziałów, wykazu skrótów, wykazu symboli występujących w rozprawie, przeglądu literatury, części zasadniczej przedstawiającej analizę proponowanej koncepcji, podsumowania i wniosków końcowych oraz wykazu literatury.

Rozdział pierwszy „*Introduction*” składa się z dwudziestu dwóch stron i przedstawia wstęp do rozprawy doktorskiej. W tym rozdziale przedstawiono motywację podjęcia tematyki oraz przedstawiono podobne rozwiązania inżynierskie występujące w literaturze.

Przedstawiono i opisano główne rodzaje tłumików uderzeniowych oraz ich praktyczne zastosowanie. W tym rozdziale uwzględniono również pozycje, które przedstawiają tłumiki drgań jako potencjalne urządzenia do odzyskiwania energii elektrycznej, co może świadczyć o kolejnych planach badawczych Doktoranta.

Na końcu tego rozdziału zamieszczono podrozdział zatytułowany „*Objectives and plan of thesis*”, który przedstawia trzy najważniejsze cele rozprawy:

1. Zaprojektowanie efektywnego prototypowego adaptacyjnego uderzeniowego tłumika drgań oraz jego badania dynamiczne w celu wyznaczenia charakterystyk oraz przeprowadzenia walidacji modelu numerycznego.
2. Zaproponowanie numerycznego modelu adaptacyjnego uderzeniowego tłumika drgań oraz zaproponowanie strategii kontroli.
3. Zaproponowanie strategii kontroli tłumika bazującej na optymalnej wysokości pojemnika tłumika.

W rozprawach cele badawcze i zadania badawcze są definiowane na różne sposoby. Moim zdaniem zdefiniowanie celów rozprawy po przeglądzie literatury jest jak najbardziej prawidłowe, gdyż czytelnik rozprawy posiada już pewne istotne informacje co ułatwia zrozumienie postawionych celi i tez. Ponadto, Autor rozprawy ma informację o lukach i problemach badawczych.

Rozdział drugi „*Adaptive Tuned Particle Impact Damper - the prototype and experimental studies*” składa się 31 stron przedstawia propozycję prototypu urządzenia zwanego adaptacyjnym uderzeniowym tłumikiem drgań oraz przedstawia projekt stanowiska badawczego w którym proponowany tłumik jest zainstalowany wraz z układem pomiarowym. Dodatkowo, szczegółowo opisano plan badań obejmujący analizę drgań swobodnych i wymuszonych belki wspornikowej z tłumikiem zamocowanym na jej swobodnym końcu. Przedstawiono wyniki analizy drgań własnych oraz drgań wymuszonych belki wraz z tłumikiem,

Rozdział trzeci zatytułowany „*Adaptive Tuned Particle Impact Damper - numerical analysis*” zawarty jest aż na 50 stronach i przedstawia badania numeryczne rozpatrywanego układu. Analizy teoretyczne opierają się na odwzorowaniu zderzenia granulatu ze ściankami obudowy z wykorzystaniem teorii miękkiego kontaktu. Wykonano wiele różnych analiz w celu opisanego proponowanego tłumika. Za pomocą analizy energetycznej określono wpływ poszczególnych zderzeń na zmianę dynamiki całego układu.

Rozdział czwarty „ATPID damper control algorithm” mieszczący się na 44 stronach przedstawia ogólną koncepcję strategii sterowania adaptacyjnym tłumikiem uderzeniowym. Przedstawiono predykcyjny algorytm sterowania, ułatwiający poszukiwanie optymalnych wysokości pojemnika tłumika.

Ostatni rozdział piąty „Summary” jest zawarty na 4 stronach i zawiera najważniejsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej, które Autor zauważył podczas realizacji rozprawy.

W wykazie literatury przedstawiono 130 publikacji naukowych, w tym dwie publikacje oraz jeden patent w których Autor rozprawy występuje na pierwszej pozycji. Warto zaznaczyć, że znaczna większość publikacji jest wydana w ostatnim czasie, uwzględniając najnowsze pozycje z 2023r. Analiza najnowszej literatury potwierdza, że Doktorant wciąż pracuje nad swoim rozwojem.

4. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Żurawskiego zatytułowana: „*Experimental Study, Numerical Analysis and Predictive Control of the Adaptive Tuned Particle Impact Damper*” jest bardzo interesująca zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia oraz niewątpliwie zawiera elementy nowości, zarówno w kierunku redukcji drgań jak i sterowania nimi.

Treść rozprawy jest podporządkowana opracowaniu własnej konstrukcji prototypowego uderzeniowego tłumika adaptacyjnego oraz sterowanie nim w czasie rzeczywistym. Uważam, że przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska jest wartościowym opracowaniem naukowym zawierającym nowe, oryginalne i ważne wyniki badań istotne zarówno z naukowego jak i użytecznego punktu widzenia.

Autor rozprawy zaprojektował a następnie wykonał prototypowy tłumik drgań, który testował na prostym stanowisku badawczym składającym się z belki wysięgnikowej wymuszanej przez odpowiedni mechanizm. Następnie dokonał szeregu różnych badań doświadczalnych oraz dokonał identyfikacji parametrów stanowiska. Skonstruowanie tłumika drgań według własnej koncepcji a następnie zastosowanie go do redukcji drgań belki świadczy o bardzo dużej wiedzy inżynierskiej, konstruktorskiej i moim zdaniem jest już dużym osiągnięciem naukowym. Co więcej, Doktorant opracował model numeryczny tłumika drgań oraz zaproponował algorytm sterowania, co pozwoliło na dobór optymalnych parametrów i efektywnej redukcji drgań.

Do najważniejszych osiągnięć i głównych zalet rozprawy doktorskiej zaliczam:

- zaprojektowanie i zbudowanie nowego prototypowego adaptacyjnego tłumika uderzeniowego z możliwości zmiany objętości komory tłumika,
- weryfikacja efektywności proponowanego tłumika drgań w redukcji drgań belki wysięgnikowej. Badanie drgań własnych oraz wymuszonych dla różnej kombinacji parametrów (różnych mas granulatu, wysokości tłumika, różnej wartości amplitudy wymuszenia),
- zwiększenie funkcjonalności proponowanego tłumika poprzez zastosowanie jego sterowania,
- opracowanie modelu numerycznego proponowanego tłumika,
- analiza teoretyczna oparta na nieliniowym wiskoelelastycznym modelu kontaktu granulatu oraz analiza wrażliwości i optymalizacja parametrów,
- koncepcja sterowania oraz walidacja koncepcji sterowania,
- zauważenie przez Doktoranta pewnych „niedoskonałości” w swojej rozprawie takich jak analiza struktury granulatu, zastosowanie sieci neuronowych, analiza magnetyzmu. Świadczy to o wysokiej świadomości naukowej Doktoranta.

Przedstawiona w rozprawie koncepcje stanowiska, metody badań, rozwiązania oraz uzyskane wyniki są dużym osiągnięciem naukowym i stanowią istotny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna. Oryginalność oraz nowość przedstawionych w rozprawie doktorskiej wyników została potwierdzona przez opublikowanie trzech artykułów w renomowanych czasopismach: *Meccanica* i *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*.

Mgr inż. Mateusz Żurawski zdefiniował sobie jasny cel badań i samodzielnie dążył do jego zrealizowania. Posiada więc umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej jak i również konstruktorskiej.

5. UWAGI KRYTYCZNE, PYTANIA MERYTORYCZNE ORAZ UWAGI DYSKUSYJNE

Moja recenzja nie zawiera uwag krytycznych, które by obniżały jej poziom naukowy. Jednak, podczas analizy rozprawy doktorskiej nasunęły mi się pewne uwagi i komentarze:

1. W rozprawie doktorskiej nie dostrzegłem tytułu w języku polskim. Zaznaczam, że w języku polskim podany jest abstrakt a nawet słowa kluczowe. Moim zdaniem powinien on być podany.

2. W rozprawie nie zauważyłem zdefiniowanej tezy pracy oraz wyraźnego głównego celu naukowego. Co prawda cele badań można ustalić analizując rozdział 1.3. Jednak w mojej opinii cel główny rozprawy powinien zostać jasno sprecyzowany.

3. Uważam, że parametry prototypowego tłumika powinny zostać podane. Są to kluczowe informacje, które pozwalają potencjalnym naukowcom „odtworzyć” uzyskane wyniki. W rozdziale 2.1 zatytułowanym „*The concept and design of the ATPID damper*” Dyplomant opisuje adaptacyjny tłumik drgań oraz prezentuje go na rysunku Fig. 2.1(a) i 2.1 (b). Moim zdaniem powinny zostać podane dokładne wymiary proponowanego tłumika oraz inne istotne jego cechy, szczególnie parametry silnika elektrycznego,

4. W streszczeniu Autor używa pojęć „amortyzator” i „tłumik”. Czy według Doktoranta oba pojęcia oznaczają to samo?

5. Fig. 2.1(a) nie przedstawia modelu 3D tylko raczej przekrój tłumika.

6. Brak jest informacji czy w kontenerze tłumika znajduje się gaz (powietrze). W jaki sposób zredukowano efekt „poduszki powietrznej”. Czy Dyplomant wykorzystywał lub planuje wykorzystać różne środowiska, w których umieszczony jest granulat?

7. Brak jest dokładnego wyjaśnienia, dlaczego w tłumiku wykorzystano granulat zrobiony z materiału Polylactide (PLA),

8. Uważam, że zdjęcie drukarki 3D jest niepotrzebne nie wnosi istotnych informacji. Podanie informacji (symbolu) o drukarce jest wystarczające.

9. Dlaczego w stanowisku badawczym zastosowano mechanizm krzywkowy do realizowania wymuszenia. Czy nie łatwiej było zastosować wzbudnik drgań? Pozwoliłoby to na zadanie dokładnych wartości parametrów wymuszenia a także zdjęcie charakterystyk przy analizie pasm częstotliwościowych w obu kierunkach.

10. W jakim celu w stanowisku badawczym zastosowano dwa inertery? Jaką one pełniły rolę?

11. Gdzie na stanowisku badawczym zainstalowano czujnik przyspieszenia. Dlaczego zastosowano dwa sposoby pomiarów przyspieszenia belki. Jakie wyszły różnice w tych pomiarach. Czy miało to na celu oszacować wpływ dynamiki przewodu w czujniku.

12.

13. Brak jest modułu Younga belki wspornikowej, co jest kluczowe w badaniach dynamiki układów ciągłych.

14. W Tabeli 2.1 cała masa układu jest podana 0.360[kg] natomiast w opisie 0.35[kg]. Która wartość jest prawidłowa?

15. Brak jest informacji o liczbie powtórzeń pomiarów przy wyznaczaniu logarytmicznego dekrementu tłumienia. Czy te wyniki wynikają z uśrednienia kilku pomiarów, czy jedynie z kilku okresów?

16. Czy Doktorant nie rozważał badanie kolizji za pomocą szybkiej kamery. Można to zrobić w łatwy sposób poprzez zastosowanie bezbarwnego kontenera tłumika. Umożliwiłoby to określenie zderzeń ziaren a także pozwoliłoby oszacować jak inne efekty (rotacje ziaren, zderzenia ukośnie) wpływają na dynamikę granulatu.

17. Jaki może wpływ sklejanie ziaren na efektywność tłumika? Czy wysokość pojemnika tłumika (objętość) ma wpływ na sklejanie granulatu?

18. W rozprawie stwierdzono, że największą skuteczność tłumika ATPID osiąga się dla największej masy ziarna i większej amplitudy wymuszenia. Z czego to może wynikać?

19. Brak jest dalszych kierunków badań, które Autor rozprawy na pewno je zauważył. Jakie dalsze kierunki badań są planowane przez Doktoranta?

Moje uwagi i komentarze nie obniżają poziomu merytorycznego ocenionej rozprawy ani nie mają wpływu na zrozumienie treści rozprawy. Praca jest przygotowana starannie a znaczna większość wyników i ich opis jest klarowny.

6. POZOSTAŁE UWAGI

Pod względem językowym przedstawiona do oceny rozprawa doktorska nie budzi moich zastrzeżeń. Autor rozprawy dość sprawnie posługuje się naukowym technicznym językiem angielskim. Pod względem edytorskim praca jest przygotowana na wysokim poziomie. Jednakże Autor nie uniknął pewnych błędów edycyjnych, które nie wpływają na poziom merytoryczny rozprawy:

- w wykazie oznaczeń i skrótów brak jest niektórych oznaczeń, np. PLA, FDM, COR. Moim zdaniem, nie powinno się podawać skrótów, które są używane w rozprawie tylko raz np. FDM, KK,
- na niektórych rysunkach przy opisie różnych modeli tłumika podano symbole wymiarów, lecz nie podano ich wartości (np. Fig. 1.3, Fig.1.4). Moim

zdaniem tych wymiarów nie powinno się zaznaczać, gdyż nie wnoszą one istotnych informacji,

- na niektórych rysunkach są stosowane różne czcionki (Fig 1.11 i Fig. 1.10) i różne jej rozmiary. Warto to było ujednoczyć,
- symbole czujników zostały podane w dwóch miejscach w rozprawie. W zupełności wystarczy podać raz ich opis,
- według mnie w celu łatwiejszej analizy i porównania wykresów można było zastosować te same zakresy osi. W przypadku pokazania czegoś szczególnego można dodać zoom takiego fragmentu wykresu,
- Na str. 81 Doktorant odwołuje się do modelu tłumika z rysunku 2.7 (7 wers od dołu). Rysunek 2.7 przedstawia zdjęcia czujników pomiarowych a nie model tłumika,
- Rys. 3.3(a) i 3.3(b) są chyba zamienione (lub ich podpisy są zamienione),
- wykaz pozycji literaturowych powinien być ujednoczony. Pozycja 121 ma inną formę od pozostałych. Niektóre pozycje z dwoma autorami są pisane w klasyczny sposób (same nazwiska) a niektóre z użyciem członu *et al.* lub *and*,
- uważam, że niektóre wykresy można było sporządzić w skali logarytmicznej, ponieważ byłyby one bardziej czytelne (np. Fig. 4.38, 4.40, 4.43)
- wyrażenie *et al.* oznaczająca „i inni” pisze się po występujących autorach nie pomiędzy nimi (pozycja literaturowa 69),
- w pozycjach literaturowych są podane numery doi. Myślę, że warto by go połączyć z linkiem, co ułatwiłoby przejście do pozycji źródłowej,

Chciałem podkreślić, że wymienione powyżej uwagi i drobne niedociągnięcia nie mają wpływu na zrozumienie treści rozprawy. Praca jest przygotowana starannie a znaczna większość rysunków jest czytelna.

7. OCENA ROZPRAWY I WNIOSEK KOŃCOWY

Oceniając całość rozprawy doktorskiej uważam, że Doktorant wykazał się bardzo dobrą wiedzą teoretyczną oraz dużymi umiejętnościami naukowymi. Przeprowadzone przez Autora rozprawy badania doświadczalne, opracowane modele numeryczne charakteryzują się wysokim poziomem naukowym. Doktorant uzyskał dużą zgodność pomiędzy wynikami teoretycznymi a doświadczeniem. Świadczy to o wysokich umiejętnościach a także o dużej świadomości naukowej. Ponadto, Doktorant opublikował uzyskane wyniki w renomowanych journalach, co tylko potwierdza ich oryginalność i ich

wysoką jakość naukową. Otrzymane wyniki pozwoliły wzbogacić istniejącą wiedzę oraz stanowią oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego w modelowaniu tłumików granulatowych.

Moja całościowa ocena recenzowanej rozprawy doktorskiej jest bardzo wysoka. Doktorant udowodnił, że posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej. Biorąc pod uwagę wartość naukową, poznawczą, uzyskane wyniki oraz wyraźny wkład własny Doktoranta stwierdzam, że pomimo zawartych moich uwag, przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wszystkie aktualnie obowiązujące ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i bez wątpienia stanowi podstawę do ubiegania się o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Wobec powyższej mojej oceny, wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Żurawskiego do publicznej obrony. Moim zdaniem rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Żurawskiego, że względu na wysoki poziom naukowy zasługują na wyróżnienie.



dr hab. inż. Krzysztof Kęcik, prof. uczelni