

dr hab. inż. Anna TIMOFIEJCZUK, prof. PŚ
Politechnika Śląska
e-mail: atimofiejczuk@polsl.pl

Gliwice, 10.01.2025

OPINIA

o pracy doktorskiej mgra inż. Jakuba GRABCA

pt. Badania konstrukcji układu posadowienia robota przemysłowego w celu optymalizacji własności dynamicznych systemu podstawa mocująca-robot-obiekt manipulowany

Opinię opracowano na zlecenie Przewodniczącego rady Dyscypliny Inżynierii Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

1. Wstęp

Robotyzacja i automatyzacja, najczęściej rozpatrywana w kontekście zastosowań przemysłowych jest coraz częściej stosowana w zadaniach wymagających bardzo dużej precyzji, a także w zastosowaniach innych niż przemysłowe, w tym w medycynie. W takich przypadkach duża dokładność wykonywanych operacji oraz trajektorii organów roboczych ma kluczowe znaczenie i decyduje o możliwości zastosowania robota. Zagadnienia te są bezpośrednio związane z eliminacją drgań organów roboczych, a to z kolei jest efektem odpowiedniego zamocowania i posadowienia robota. W literaturze i praktyce przemysłowej istnieje wiele przykładów aktywnego i pasywnego tłumienia drgań w różnych układach. Bardzo wiele interesujących propozycji opracowano dla przemysłu motoryzacyjnego, ale także wiele z nich stosowanych jest w robotyce i urządzeniach automatyki. Biorąc pod uwagę te zastosowania zauważyć należy, że są one zazwyczaj opracowywane i budowane dla konkretnego zastosowania i nie nadają się do przeniesienia na inny rodzaj robota lub linię produkcyjną. Dostawcy robotów zwykle nie oferują także tego rodzaju urządzeń. W tym kontekście tematyka praca, której celem jest opracowanie układu do eliminacji drgań, który spełniałby kilka warunków, w tym możliwość zastosowania dla innych rodzajów robotów, ale także łatwego demontażu, przeniesienia i montażu, jest bardzo aktualna, a rozwiązanie z bardzo dużym prawdopodobieństwem może być wdrożone. Praca jest efektem realizacji doktoratu wdrożeniowego.

2. Opis rozprawy

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów i została opracowana w języku polskim. Na początku pracy zamieszczono krótkie streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz skrótów i oznaczeń

zawartych w pracy. Na końcu pracy spis literatury liczący 65 pozycji oraz spisy rysunków i tabel. Wraz ze streszczeniami oraz wykazem literatury rozprawa liczy 150 stron.

W rozdziale 1. pt. *Wprowadzenie*, liczącym 42 strony, zawarto na charakterystykę tematu pracy. Opisano w nim stan robotyzacji w Polsce i na świecie, główne obszary i branże zastosowań robotów oraz kierunki rozwoju robotyzacji. W rozdziale przedstawiono także klasyfikację robotów, a w zasadzie manipulatorów przemysłowych i dokładniej omówiono roboty typu delta, które są przedmiotem pracy. Na tym tle omówiono główny problem badawczy podejmowany w ramach pracy, to jest minimalizację drgań robota, przy jednoczesnym jego dynamicznym działaniu. Autor pracy podzielił znane z literatury podejścia do tego zagadnienia na następujące zadania:

- kształtowanie profili przyspieszeń,
- planowanie trajektorii ruchu,
- kształtowanie własności dynamicznych konstrukcji,
- aktywne i pasywne techniki eliminacji drgań.

Zadaniom tym poświęcone są odrębne części rozdziału, w których dokładnie omówiono stosowane podejścia i wskazano odpowiednie opracowania bibliograficzne.

Rozdział 2, zatytułowany *Cel i teza pracy*, liczący 4 strony zawiera podsumowanie stanu robotyzacji w Polsce, wyjaśnienia wyboru obiektu badań, czyli robotów typu delta oraz znaczenia odpowiedniego montażu tego typu robota dla jego poprawnego funkcjonowania. W rozdziale opisano cel pracy, jakim jest zaprojektowanie uniwersalnej podstawy robota typu delta, pozwalającej na minimalizację drgań, a także „zbadanie własności dynamicznych podstaw mocujących dla wybranych robotów przemysłowych, analiza ich wpływu na jakość pracy robotów oraz opracowanie skutecznej metody minimalizacji drgań systemu”. W pracy zawarto jedną hipotezę badawczą sformułowaną następująco: „możliwa jest efektywna minimalizacja drgań systemu podstawa-robot-obiekt poprzez zastosowanie podstawy mocującej robota o odpowiednio dobranych własnościach dynamicznych”. W dalszej części rozdziału zawarto wykaz prac, które Autor wykonuje w celu realizacji pracy i udowodnienia hipotezy badawczej. Kolejne rozdziały pracy poświęcone są punktom zawartym w przedstawionym harmonogramie.

Rozdział 3, zatytułowany *Projekt podstawy robota delta*, liczący 17 stron, składa się z dwóch części, w których zawarto odpowiednio:

- projekt konstrukcyjny robota, w którym dokładnie scharakteryzowano wybrany rodzaj materiałów, rodzaje kształtowników oraz sposoby ich połączenia. Opisano dokładnie rodzaj wybranego robota, którym jest model M3iA/64 firmy Fanuc. Przedstawiono także wizualizację zamocowania robota w zaprojektowanej ramie.

- budowę modelu MES opracowanego dla celów badań symulacyjnych, które przeprowadzono dla różnych wariantów, bez zamocowania robota i zamocowanym robotem. W rozdziale zaprezentowano odpowiednie wykresy oraz graficzną wizualizację drgań całego układu.

Rozdział 4, zatytułowany *Badania doświadczalne podstawy robota delta*, który liczy 9 stron został również podzielony na dwie części, które opisują:

- badania modalne konstrukcji, w której zawarto dokładny opis kolejnych kroków badań eksperymentalnych, zilustrowany dokumentacją zdjęciową oraz wykresami przedstawiającymi postaci drgań ramy z robotem.
- walidację wyników uzyskanych w badaniach z wykorzystaniem analizy modalnej. W tej części rozdziału pokazano i omówiono porównanie wyników uzyskanych przy zastosowaniu obydwu podejść. Porównanie zostało zilustrowane odpowiednimi wykresami i wizualizacją modeli.

Rozdział 5, zatytułowany *Badania możliwości wykorzystania aktywnych metod tłumienia drgań podstawy robota delta*, liczący 11 stron opisuje stanowisko badawcze opracowane i zbudowane przez Autora, w którym zastosowano aktywny eliminator drgań składający się ze wzbudnika elektromagnetycznego zamocowanego do ramy robota. Badania zostały przeprowadzone w warunkach przemysłowych, co zostało zilustrowane dokumentacją zdjęciową. W trakcie badań testowano pasywne i aktywne tłumienie drgań oraz pokazano przykłady dwóch algorytmów aktywnego tłumienia drgań, w tym jeden konwencjonalny i jeden opracowany przez Autora rozprawy. W rozdziale tym zaprezentowano wyniki zastosowania aktywnego eliminatora drgań. Na wykresach amplitudy drgań widoczny jest dwukrotny spadek wartości amplitudy drgań po zastosowaniu eliminatorów.

W rozdziale 6, zatytułowanym *Badania możliwości wykorzystania pasywnych metod tłumienia drgań podstawy robota delta*, liczącym 17 stron, zawarto opis materiału, z którego wykonane elementy służące do tłumienia drgań ramy. Zastosowano polimerobeton składający się z pyłu i wypełniacza mineralnego o różnej frakcji. Materiałem tym zostały wypełnione kształtowniki, z których wykonana jest podstawa robota. Autor zbudował stanowisko testowe do badania belek wypełnionych materiałem tłumiącym drgania. Przeprowadzone badania zostały opisane i zilustrowane wykresami i danymi uporządkowanymi w tabelach. W omawianym rozdziale opisano także budowę pasywnego modelu MES dla przypadku pasywnego tłumienia drgań. Jego zastosowanie zilustrowano odpowiednimi wykresami pokazującymi charakterystyczne częstotliwości oraz wizualizacją postaci drgań całego układu. W kolejnych częściach rozdziału opisano badania modalne dla tego układu, których wyniki udokumentowano wykresami i wizualizacją modeli. W końcowej części rozdziału pokazano porównanie wyników uzyskanych przy pomocy symulacji, z wynikami badań eksperymentalnych.

Rozdział 7, zatytułowany *Doświadczalna weryfikacja* liczący 15 stron porusza problematykę poprawnego pomiaru drgań układów, które wykonują duże ruchy kinematyczne. W rozdziale opisano podejścia, jakie używano do pomiaru drgań i przeprowadzono analizę możliwości, zasadności

i poprawności ich użycia. Badania zostały zilustrowane fotografiami, modelami ukazującymi wizualizację stanowiska oraz wykresami.

W rozdziale 8, zatytułowanym *Analiza porównawcza metod aktywnych i pasywnych tłumienia drgań podstawy robota delta*, liczącym 4 strony, zawarto wyniki porównania obu zastosowanych podejść, pasywnego i aktywnego oraz wyjaśnienie dotyczące wyboru końcowego rozwiązania.

Rozdział 9, zatytułowany *Wnioski końcowe*, liczący 7 stron składa się z dwóch części:

- podsumowania badań przeprowadzonych w ramach realizacji pracy doktorskiej, w którym opisano kolejne etapy pracy,
- informacji na temat tego, że doktorat realizowany jest w ramach programu doktoraty wdrożeniowe. W tej części zawarto informacje dotyczące wdrożenia efektów pracy w firmie Fanuc, której pracownikiem jest Autor, a firma brała także udział w projekcie doktoraty wdrożeniowe prowadzonym w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie.

W końcowej części pracy zawarto wykaz literatury uporządkowany według kolejności cytowania w pracy, liczący 65 pozycji oraz spisy rysunków i tabel uporządkowane według kolejności ich występowania w pracy.

Układ pracy jest typowy dla prac doktorskich, w których zwykle w pierwszej części określa się zakres badań, definiuje aktualny stan wiedzy na podstawie wyników badań literaturowych, a następnie formułuje się problem badawczy. Praca została podzielona na rozdziały o porównywalnych długościach, w których nie zauważa się nadmiernych opisów badań literaturowych, ale niektóre podsumowania aktualnego stanu wiedzy i zastosowań przemysłowych są powtarzane i zamieszczone w pracy w kilku miejscach. Jednak ze względu na przyjęte przez Autora rozmieszczenie treści taki sposób opisu tematu oceniam jako bardzo dobry. Przegląd literatury udokumentowano poprzez wykaz literatury zawierający aktualne prace, ale głównie zagraniczne. Przegląd literatury oraz wykaz nie zawierają odniesień do badań prowadzonych w Polsce. Badania dotyczące aktywnego i pasywnego tłumienia drgań różnych układów, w tym układów związanych z mocowaniem i posadowieniem robotów były prowadzone w wielu ośrodkach w Polsce. Informacje dotyczące takich badań nie zostały zamieszczone w pracy.

Należy podkreślić, że praca została zredagowana bardzo starannie. Jednak, ze względu na bardzo dużą liczbę ilustracji zawartych w pracy, co jest jej dużą zaletą, dużą trudnością było zapewne jej sformatowanie. Jest to widoczne w pracy w wielu miejscach, gdzie pozostawiono puste fragmenty stron.

3. Uwagi dotyczące doboru tematu, celu, tez i zakresu rozprawy

Temat pracy dotyczy bardzo ważnego zagadnienia jakim jest robotyzacja, a w szczególności efektywne i coraz szersze zastosowanie robotów. Jak słusznie zauważa Autor, jednym z najważniejszych problemów w tym przypadku jest zastosowanie odpowiednich układów mocowania robotów, układów pomiarowych oraz poprawne zaprojektowanie i zaprogramowanie ich działania. Jest to szczególnie

istotne w przypadku realizacji bardzo precyzyjnych prac, w tym także zabiegów medycznych, w których coraz częściej stosuje się roboty. Znalezienie poprawnego i uniwersalnego sposobu posadowienia robotów jest w tym przypadku kluczowe. Temat pracy jest bardzo aktualny i znalezienie rozwiązania przedstawionych w pracy problemów jest kluczowe.

Cele pracy jaki wyznaczył Autor pracy można sformułować jako poszukiwanie odpowiedniego, uniwersalnego i łatwego w transporcie, montażu i demontażu posadowienia (podstawy) robota, która pozwalałoby na eliminację drgań powodujących błędy w zaplanowanej trajektorii robota, w szczególności w realizacji bardzo precyzyjnych zadań

Zakres rozprawy dobrano prawidłowo, stosowanie do sformułowanego celu rozprawy. Należy jednak podkreślić bardzo wiele odniesień do praktyki przemysłowej, przy jednoczesnym opisanu metod badawczych, co znacznie podnosi wartość pracy.

4. Ocena merytoryczna

Należy podkreślić, że tematyka pracy, podjęta przez Doktoranta, wpisuje się w kilka dyscyplin naukowych, w tym głównie w inżynierię mechaniczną, ale także w automatykę, elektronikę, elektrotechnikę oraz technologie kosmiczne. Ponadto, biorąc pod uwagę zaproponowane przez Doktoranta metody, należy podkreślić także to, że wymagały one znajomości zagadnień z zakresu Inżynierii Materiałowej. Podjęty przez Doktoranta temat pracy ma charakter interdyscyplinarny i połączenie wiedzy z kilku dyscyplin oceniam bardzo pozytywnie. Ponadto, należy podkreślić, że duża część pracy ma charakter eksperymentalny i jest wynikiem wielu testów przeprowadzonych w środowisku laboratoryjnym na uczelni oraz w środowisku przemysłowym. Wymagało to od Doktoranta zaplanowania badań, budowy stanowisk badawczych, ich przeprowadzenia badań i porównania wyników z badaniami symulacyjnym oraz wyciągnięcia wniosków. Uważam, że ta część pracy została wykonana bardzo starannie i bardzo dobrze opisana.

4.1 Elementy oryginalne

Na podstawie rozprawy oceniam, że najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta są:

1. zaproponowanie uniwersalnej podstawy do robota typu delta, charakteryzującej się możliwością szybkiego i łatwego montażu i demontażu,
2. zaproponowanie kilku rodzajów eliminacji drgań,
3. zaproponowanie pasywnej eliminacji drgań za pomocą materiałów specjalnych, którymi wypełniono elementy podstawy robota.

4.2 Uwagi dyskusyjne

1. W pracy Autor przeprowadza badania i poszukuje odpowiedniej metody eliminacji drgań bazując na pomiarach drgań robota, a w szczególności jego organów roboczych. W pracy

pokazano kilka podejść do pomiarów drgań i ich analizę. Czy Autor bierze w nich pod uwagę otoczenie robota, w tym inne urządzenia, które mogą zakłócać działanie robota, oraz własności podłoża, na jakim umieszczony jest robot? Czy zdaniem Doktoranta, czynniki te mogą i powinny być brane pod uwagę? Czy zdaniem Doktoranta możliwe jest ich uwzględnienie w pasywnej, czy aktywnej eliminacji drgań?

2. Jednym z głównych celów Autora pracy jest zbudowanie podstawy, która jest uniwersalna i może być używana do różnych typów robotów? Czy istnieją jednak jakieś ograniczenia dotyczące uniwersalności tej podstawy i jak Autor zamierza je rozwiązać?
3. W całej pracy Doktorant używa pojęcia robot i także w przeglądzie literatury wymienia rodzaje robotów, ale faktycznie, wszystkie wymienione urządzenia są manipulatorami przemysłowymi, powszechnie nazywanymi robotami. Biorąc jednak pod uwagę najczęściej stosowany podział robotów na roboty mobilne, z różnymi platformami oraz roboty przemysłowe, manipulatory, wydaje się, że w pracy brakuje komentarza na temat takiego podziału, co sugeruję w przypadku dalszych publikacji.

5 Wniosek końcowy

Podjęty i rozwiązany przez Doktoranta problem badawczy jest bardzo ważny z perspektywy rozwoju robotyzacji i automatyzacji wielu procesów, nie tylko przemysłowych. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* oraz wymaganą umiejętnością zaplanowania i samodzielnego przeprowadzenia badań naukowych. Sformułowane przeze mnie uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca doktorska Mgra inż. Jakuba Grabca pt. *Badania konstrukcji układu posadowienia robota przemysłowego w celu optymalizacji własności dynamicznych systemu podstawa mocująca-robot-obiekt manipulowany* spełnia wymagania Art. 187 p.1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.