Rzeszów 18.11.2024 r

Prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Grabca nt. „Badania konstrukcji układu posadowienia robota przemysłowego w celu optymalizacji własności dynamicznych systemu podstawa mocująca-robot-obiekt manipulowany"

I. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie dr hab. inż. Krzysztofa Danileckiego, prof. ZUT (pismo WIMiM/286/2024).

Recenzowana rozprawa liczy 150 stron. Jej treść podzielona jest na 9 rozdziałów i oprócz tekstu zawiera 78 rysunków i 4 tabele. Rozdziały główne poprzedzają streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz skrótów i oznaczeń oraz spis treści a pracę zamyka wykaz literatury liczący 65 pozycji oraz spis rysunków i spis tabel.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi „Wprowadzenie". Zawiera syntetyczne zarysowanie genezy i tematyki rozprawy. Opisano w nim także klasyfikację robotów, wyłaniając obiekt badań – robot o kinematyce równoległej (robot typu Delta). Następnie scharakteryzowano roboty typu Delta, zwracając uwagę na konieczność stosowania w praktyce ram nośnych, na których robot zawieszony jest przez cały czas swojej pracy. Producenci robotów nie oferują podstaw, postumentów ani ram. Odpowiedzialność za dobranie, projekt i wykonanie odpowiedniej podstawy czy ramy spada zatem na integratorów lub nawet użytkowników końcowych robotów. W trzecim podrozdziale podjęto tematykę robotów przemysłowych w Polsce i na świecie. Przedstawiono wskaźniki liczbowe dotyczące poziomu robotyzacji przemysłu wskazując na potencjał rozwojowy tego procesu. Wskazano, że praca może być użyteczna zarówno dla robotów już zainstalowanych jak i tych, które dopiero będą instalowane. Rozdział pierwszy zamyka przegląd stanu zagadnienia. W jego ramach przedstawiono przegląd prac badawczych koncentrujących się na minimalizacji drgań robotów, wskazując syntetycznie, że drgania robotów to istotny problem w praktyce przemysłowej. Zwrócono uwagę na cztery sposoby minimalizacji drgań: kształtowanie profili przyspieszeń, planowanie trajektorii ruchu, kształtowanie własności dynamicznych konstrukcji oraz aktywne i pasywne techniki eliminacji drgań. Na podsumowanie stwierdzono syntetycznie, że interesująca będzie próba implementacji wybranych technik aktywnego i pasywnego tłumienia drgań w odniesieniu do podstawy nośnej robotów, co poprawi własności dynamiczne i zminimalizuje drgania pracującego robota.

W rozdziale drugim „Cel i teza pracy" przedstawiono cel pracy, hipotezę badawczą oraz ośmiopunktowy zakres realizowanych prac projektowo-badawczych. Jako cel pracy wskazano

zbadanie własności dynamicznych podstaw mocujących dla wybranych robotów przemysłowych, analizę ich wpływu na jakość pracy robotów oraz opracowanie skutecznej metody minimalizacji drgań systemu. Przyjmując hipotezę badawczą założono, że: możliwa jest efektywna minimalizacja drgań systemu PRO (podstawa-robot-obiekt) poprzez zastosowanie podstawy mocującej robota o odpowiednio dobranych własnościach dynamicznych.

Rozdział trzeci „Projekt podstawy robota Delta" przedstawia projekt konstrukcyjny ramy nośnej robota, a także jej model wraz z wynikami badań symulacji numerycznych zrealizowanych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przedstawiono w nim konstrukcję ramy nośnej wraz z rysunkami elementów z których wykonana. Wskazano jednocześnie robot M3iA/6A japońskiej firmy FANUC Corporation jako modelowy w przeprowadzonych w pracy analizach. Modelowanie konstrukcji ramy posadowienia robota zrealizowano z użyciem metody elementów skończonych. W celu realizacji obliczeń przeprowadzono dyskretyzację modelu geometrycznego ramy robota, a następnie redukcję liczby stopni swobody z 6468 do 120 (o 98%) dla pojedynczego modelu fundamentu. Następnie przeprowadzono analizę właściwości dynamicznych w ramach której określono częstotliwości drgań własnych i postacie drgań, a także funkcje odpowiedzi częstotliwościowej. Kolejnym etapem były obliczenia w których porównano wybrane funkcje receptancji (dla ramy oraz ramy z robotem) na kierunkach X,Y i Z. Zidentyfikowano na ich podstawie dominujące częstotliwości rezonansowe dla ramy bez robota oraz dla ramy z zamontowanym robotem. Zaprezentowano także główne postacie drgań samej ramy odpowiadające poszczególnym zidentyfikowanym częstotliwościom rezonansowym oraz postacie drgań ramy z zamontowanym robotem. Analiza wyników symulacji przeprowadzona z zastosowaniem modeli MES pozwoliła na wyznaczenie form drgań, które mogą mieć istotny wpływ na drgania efektora robota Delta w trakcie ruchów o dużej dynamice. Na podsumowanie omawianego rozdziału wskazano, że utworzony model zostanie poddany weryfikacji doświadczalnej w celu sprawdzenia jego zgodności z rzeczywistym obiektem.

W rozdziale czwartym „Badania doświadczalne podstawy robota Delta" zawarto wyniki badań modalnych konstrukcji oraz porównanie częstości drgań własnych wyznaczonych w analizie modelu elementów skończonych z wynikami badań eksperymentalnych. W celu weryfikacji zbudowanych modeli elementów skończonych przeprowadzono testy eksperymentalne dynamiki konstrukcji ramy nośnej z robotem w formie testu impulsowego wykorzystując w tym celu młot modalny. Odpowiedzi mierzono za pomocą trójosiowych akcelerometrów w 233 punktach dla ramy i w 279 punktach dla ramy z robotem. Prezentując wyniki przedstawiono porównanie wybranych funkcji receptancji wyznaczonych eksperymentalnie na kierunkach X,Y i Z dla ramy z robotem oraz główne postacie drgań ramy z zamontowanym robotem, odpowiadające poszczególnym zidentyfikowanym eksperymentalnie częstotliwościom rezonansowym. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do porównania wyników symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych. Zrealizowano to poprzez porównanie częstotliwości drgań własnych wykazując dobrą zgodność wyników – średni błąd względny wynosił 5,4%.

Rozdział piąty „Badania możliwości wykorzystania aktywnych metod tłumienia drgań podstawy robota Delta" zawiera opis stanowiska badawczego oraz wyniki badań przedstawiających efekty zastosowania tradycyjnego regulatora PID do sterowania aktywnym eliminatorem drgań w formie wzbudnika elektromagnetycznego oraz efekty zastosowania do sterowania aktywnym eliminatorem regulatora LQG (Linear Quadratic Gaussian). Idea stanowiska badawczego bazowała na zastosowaniu eliminatora bezwładnościowego połączonego z konstrukcją ramy siłownikiem elektromagnetycznym. Jako eliminator bezwładnościowy zastosowano wzbudnik elektromagnetyczny o masie 100 kg podwieszony na suwnicy. W przeprowadzonych badaniach nie uzyskano zadowalających efektów przy

zastosowaniu regulatora PID do sterowania aktywnym eliminatorem drgań, problemem była jego niestabilność. Kontynuując prace badawcze zastosowano do aktywnego tłumienia drgań bardziej zaawansowany algorytm sterowania wykazujący większą odporność na zakłócenia pojawiające się w systemie aktywnego tłumienia drgań. W tym celu wybrano do sterowania aktywnym eliminatorem drgań regulator LQG. Przeprowadzone badania wykazały w tym przypadku możliwość maksymalnie dwukrotnego zmniejszenia amplitudy drgań. Nie udało się uzyskać lepszego wyniku i nie podejmowano dalszych prac w celu modyfikacji konstrukcji eliminatora.

W rozdziale szóstym „Badania możliwości wykorzystania pasywnych metod tłumienia drgań podstawy robota Delta" przedstawiono wyniki badań zastosowania materiału polimerobetonowego do pasywnego tłumienia drgań ramy. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz wyniki symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W pierwszym etapie, na podstawie badań porównawczych, wyłoniono do dalszych badań pasywnego eliminatora drgań materiał polimerobetonowy o symbolu M05. Następnie bazując na modelu utworzonym z wykorzystaniem modelu MES prowadzono symulacje numeryczne, których celem było porównanie częstości własnych rezonansowych ramy oraz wizualizacja postaci drgań w stosunku do ramy bez pasywnego eliminatora drgań. Na podstawie wyników symulacji numerycznych podjęto decyzję o zastosowaniu tłumika pasywnego w rzeczywistej konstrukcji ramy poprzez zalanie kolumn ramy polimerobetonem do wysokości 53 cm od dołu. Kolejny etap to badania modalne konstrukcji z pasywnym tłumieniem drgań. W jego ramach przeprowadzono testy eksperymentalne dynamik konstrukcji ramy nośnej robota z pasywnym eliminatorem drgań w formie testu impulsowego. Porównanie wyników badań modalnych ramy robota z pasywnym eliminatorem drgań z wynikami symulacji numerycznych wykazało, że nastąpiło prognozowane zmniejszenie amplitud dominujących rezonansów przy zachowaniu bardzo podobnych strukturalnie dominujących form drgań. Ten wniosek był wstępem do dalszych analiz, w ramach których porównano częstości drgań własnych wyznaczonych w analizie modelu elementów skończonych z wynikami badań eksperymentalnych dla konstrukcji ramy z pasywnym eliminatorem drgań. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że dla celów oceny skuteczności działania pasywnego eliminatora drgań uzyskano zadowalającą dokładność modelu. Średni błąd względny związany z wyznaczeniem częstotliwości drgań własnych wynosił 7.7%, za zadowalające uznano także wyniki jakościowego porównania wybranych funkcji receptancji.

Rozdział siódmy „Doświadczalna weryfikacja" podejmuje bardzo istotną kwestię sprawdzenia, czy wskazywana skuteczność pasywnego eliminatora drgań będzie również występowała w warunkach rzeczywistej dynamicznej pracy robota Delta. Na podstawie analizy dostępnej aparatury pomiarowej podjęto decyzję, że ocena skuteczności działania układu pasywnej eliminacji drgań będzie określana na podstawie pomiaru drgań konstrukcji ramy w dziedzinie czasu z zastosowaniem wibrometru laserowego i czujników akcelerometrycznych. Badania przeprowadzono dla dwóch zestawów trajektorii (kołowej i liniowej) ruchu chwytaka przyjmując maksymalne, dopuszczalne prędkości ruchu i przyspieszenia. Dla obu badanych trajektorii, na podstawie analizy jakościowej uzyskanych wyników prędkości, przyspieszenia i przemieszczenia, stwierdzono że pasywny eliminator drgań wyraźnie tłumi drgania ramy.

Rozdział ósmy „Analiza porównawcza metod aktywnych i pasywnych tłumienia drgań podstawy robota Delta" zawiera zestawienie analizowanych metod tłumienia drgań. Przedstawiono porównawczą analizę jakościową obejmującą wyniki symulacji na modelu MES oraz wyniki badań eksperymentalnych ramy robota bez wypełnienia i z wypełnieniem polimerobetonem. Potwierdzono, że nastąpiła znacząca redukcja amplitud dwóch głównych rezonansów. W kolejnym etapie przeprowadzono liczbową analizę porównawczą badanych aktywnych i pasywnych metod tłumienia drgań. Porównywano zarejestrowane sygnały

przyspieszeń drgań ramy w wybranym punkcie odpowiednio scałkowane do poziomu przemieszczeń. Stwierdzono, że pasywny eliminator drgań spowodował ponad 60% zmniejszenie amplitudy drgań ramy nośnej robota. Natomiast przy analizatorze aktywnym uzyskano 40% redukcję amplitud drgań.

W rozdziale dziewiątym „Wnioski końcowe" syntetycznie podsumowano zrealizowane badania wskazując na osiągnięcie postawionego celu głównego oraz potwierdzenie przyjętej hipotezy badawczej. Sformułowano także wnioski dotyczące rekomendacji zastosowania w praktyce przemysłowej pasywnej eliminacji drgań oraz wskazania rozwiązania układu tłumienia drgań podstawy robota, który jest odpowiedni do zastosowań przemysłowych. Przedstawiono także wnioski związane z wdrożeniowym kontekstem rozprawy doktorskiej. Przeprowadzone badania pozwoliły na wykonanie poprawnej z punktu widzenia sztywności ramy do mocowań robotów serii Delta. Dzięki zastosowanemu rozwiązaniu firma FANUC Polska wprowadziła do oferty swoich robotów typoszeregu Delta oraz DR dodatkowo ramę mocującą robota. Ramy są aktualnie oferowane na rynku wraz z samym robotem w ramach zapotrzebowania klientów końcowych oraz integratorów. Zaprojektowana rama jest również wykorzystywana podczas targów branżowych do prezentacji robotów serii Delta, jej zastosowanie jest również zaplanowane przy budowie nowopowstałego centrum pokazowego FANUC Polska we Wrocławiu.

II. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1. Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

W pracy podjęto tematykę mającą swoje źródła w praktyce przemysłowej i wynikającą z dynamicznego rozwoju zrobotyzowanych systemów produkcyjnych. Współcześnie roboty stanowią znaczną i stale zwiększającą się część nowoczesnego wyposażenia produkcyjnego. Jednak pełne wykorzystanie możliwości zrobotyzowanych systemów warunkowane jest spełnieniem w trakcie ich montażu i eksploatacji określonych wymogów. Jednym z najistotniejszych jest zapewnienie, aby w trakcie pracy w układzie podstawa-robot-obiekt manipulowany nie generowały się nadmierne drgania. Zbyt duży poziom drgań może skutkować koniecznością zmniejszenia prędkości ruchów i przyspieszeń, co negatywnie wpływa na mającą istotne znaczenie konkurencyjne wydajność systemów produkcyjnych. Jeszcze istotniejszy jest negatywny wpływ nadmiernego poziomu drgań przy współpracy robota z systemem wizyjnym. Zbyt wysoki poziom drgań może prowadzić do nieprecyzyjnego złapania elementu, czy nawet jego zgubienia, co jest nieakceptowalnym zakłóceniem produkcji lub montażu. Z tych powodów montaż i późniejsza niezawodna eksploatacja robota wymagają odpowiedniej konstrukcji podstawy/ramy nośnej. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku robotów równoległych Delta. Podstawa taka powinna nie tylko posadowić i utrzymać robota nad linią produkcyjną, ale powinna być odpowiednio sztywna i wytrzymała. Szczególnie w przypadku robotów Delta, zdarza się, iż podstawa i sposób jej wykonania powoduje generowanie nadmiernych drgań układu podstawa-robot-obiekt manipulowany. Producenci i dostawcy robotów najczęściej nie oferują podstaw wraz z robotami, pozostawiając problem projektu i wykonania po stronie użytkownika. W tym kontekście opracowanie rozwiązania konstrukcyjnego podstawy dla robotów serii Delta, które będzie skutecznie minimalizowało poziom drgań, zwiększy ich niezawodność i zmniejszy koszt inwestycji jest ważnym problemem współczesnej rzeczywistości przemysłowej.

W rozprawie doktorskiej podjęto zatem uzasadnioną, aktualną i istotną z punktu widzenia naukowo-badawczego i wdrożeniowego tematykę implementacji wybranych technik aktywnego i pasywnego tłumienia drgań w odniesieniu do podstawy nośnej robotów, w celu poprawy własności dynamicznych i minimalizacji drgań pracującego robota. Jej aspekt

naukowy zakładał zbadanie własności dynamicznych podstaw mocujących dla wybranych robotów przemysłowych, analizę ich wpływu na pracę robotów oraz opracowanie na tej podstawie skutecznej metody minimalizacji drgań systemu podstawa-robot-obiekt manipulowany. Badania w tym zakresie są niezbędne w celu wyboru rozwiązania układu tłumienia drgań podstawy robota do zastosowania przemysłowego, co jest celem głównym doktoratu wdrożeniowego.

2.2. Realizacja badań i uzyskane rezultaty

Praca zawiera wyniki symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych. W jej ramach przeprowadzono nakierowane na uzyskanie celu pracy i potwierdzenie hipotezy numeryczno-eksperymentalne badania podstawy robota Delta. Przeprowadzone w pracy badania zawężono do konkretnego robota (model M-3iA/6A), zastosowany wybór nie został uzasadniony. Badania poprzedzono opracowaniem projektu konstrukcyjnego podstawy, następnie opracowano jej model z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przeprowadzono następnie symulacje numeryczne drgań ramy, które pozytywnie zweryfikowano porównując z badaniami eksperymentalnymi dynamiki konstrukcji ramy nośnej w formie testu impulsowego. Następnie przeprowadzono badania eksperymentalne możliwości zastosowania aktywnych metod tłumienia drgań podstawy robota Delta, gdzie nie uzyskano zadowalających rezultatów. Kolejnym etapem były badania możliwości pasywnego tłumienia drgań podstawy robota z wykorzystaniem materiału polimerobetonowego. Przeprowadzono w tym zakresie symulacje numeryczne z wykorzystaniem MES, które następnie pozytywnie zweryfikowano badaniami eksperymentalnymi w formie testu impulsowego. Stwierdzono, że pasywny eliminator drgań istotnie zmniejsza amplitudy dominujących rezonansów, co było punktem wyjścia do sprawdzenia rozwiązania w warunkach rzeczywistej pracy robota Delta. Skuteczność działania układu pasywnej eliminacji drgań określano na podstawie pomiaru drgań konstrukcji ramy dla dwóch trajektorii ruchu chwytaka robota. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły zadowalającą skuteczność pasywnego eliminatora drgań w formie wypełnienia polimerobetonowego. Bazując na wynikach badań wykonano i wdrożono w praktyce poprawną z punktu widzenia sztywności ramę do mocowań robotów serii Delta.

Analizując zrealizowane badania można stwierdzić, że w pracy założono i zrealizowano autorski plan badań. Badania przeprowadzono wykorzystując nowoczesne narzędzia symulacji numerycznych oraz nowoczesną aparaturę badawczą. Co bardzo istotne, wyniki symulacji numerycznych weryfikowano eksperymentalnie uzyskując dobrą zgodność wyników. Opis metodyki badań jest precyzyjny, a prezentacja wyników badań jest przejrzysta i czytelna.

Przeprowadzone badania doprowadziły do osiągnięcia postawionego celu głównego w postaci opracowania skutecznej metody minimalizacji drgań systemu podstawa – robot – obiekt manipulowany. Osiągnięcie celu głównego było możliwe dzięki zbadaniu właściwości dynamicznych podstawy mocującej dla wybranych robotów przemysłowych oraz analizie ich wpływu na jakość pracy robotów. W efekcie końcowym, bardzo istotnym z punktu widzenia wdrożeniowego charakteru doktoratu, zrealizowane prace projektowo-badawcze pozwoliły na określenie rozwiązania układu tłumienia drgań podstawy robota, który jest odpowiedni do zastosowań przemysłowych.

Analiza uzyskanych efektów badań pozwala stwierdzić, że w pracy podjęto i rozwiązano oryginalny problem naukowy związany z określeniem poprzez badania numeryczno-eksperymentalne właściwości dynamicznych podstaw mocujących dla wybranego typu robota przemysłowego, analizą ich wpływu na jakość pracy robotów oraz opracowaniem skutecznej metody minimalizacji drgań systemu PRO. Ponadto wskazywane oryginalne wyniki badań

naukowych zostały wdrożone w sferze gospodarczej. Autor rozprawy potwierdził także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Zakres i poziom naukowy spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka rozprawy zawiera się w ramach dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Recenzowana praca może być zatem podstawą nadania stopnia naukowego doktora, oczywiście pod warunkiem pozytywnego wyniku jej obrony.

2.3. Strona edytorska i redakcyjna pracy

Generalnie praca napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem. Występują w niej nieliczne usterki o charakterze edytorskim, stylistycznym lub redakcyjnym. Przykładowo:
- str. 21 „Roboty typu Delta nie montuje się pod kątem…",
- str. 56 „…i sposób jej wykonania powoduje powstawania nadmiernych drgań…",
- str. 78 „…charakterystyki FRF z dwóch punktów pomiarowych: jeden na pierścieniu osadczego (P1)…"
- str. 97 „Wyprodukowana belka została zawieszone na stalowych linkach…",
- str. 117 „…będą realizowane w dziadzinie częstotliwości".

Oczywiście w przypadku recenzowanej rozprawy wskazywane usterki nie mają żadnego negatywnego wpływu na zrozumienie jej treści. Układ pracy generalnie jest poprawny, tylko na początku podrozdziału 1.4 pojawia się tzw. „tekst wiszący" . Cytowana w rozprawie literatura jest aktualna, zdecydowana większość przywoływanych pozycji jest wydana po roku 2010. Pozycje literaturowe są zamieszczone w spisie w kolejności cytowania. Przegląd literatury jest syntetyczny (65 pozycji) i właściwie przedstawia stan wiedzy z punktu widzenia przedstawianej rozprawy doktorskiej.

Z drobniejszych usterek redakcyjnych można jeszcze zwrócić uwagę na numerację rysunków. W rozdziale pierwszym rysunki mają numerację składającą się z trzech liczb i wszystkie, niezależnie od podrozdziału, rozpoczynają się od oznaczenia „1.1", a następnie wskazywany jest kolejny numer rysunku w rozdziale pierwszym. Od rozdziału drugiego numeracja rysunków jest dwuliczbowa, i przypisuje rysunki kolejno do rozdziału. Jest to poprawne, z wyjątkiem pierwszego (i jedynego) rysunku w rozdziale drugim, który oznaczono jako 2.11. Drobnymi usterkami redakcyjnymi są także kropki to tytułach rozdziału ósmego i dziewiątego, a także podrozdziału 1.4.4.

2.4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Każda praca naukowa nasuwa pewne pytania i wątpliwości, jak również stanowi punkt wyjścia do dyskusji i wyznaczania kierunków dalszych badań. Mam w tym kontekście sformułowane poniżej uwagi do recenzowanej rozprawy.

1. W tytule rozprawy znajduje się określenie, że badania prowadzone są w „celu optymalizacji własności dynamicznych systemu podstawa mocująca-robot-obiekt manipulowany". Zawarte w tytule sformułowanie dotyczące optymalizacji jest nieco na wyrost. Badania nie zawierają sformalizowanej procedury optymalizacyjnej.

2. W pracy jako obiekt badań zastosowano robota o kinematyce równoległej – tzw. robota Delta model M-3iA/6A. Dlaczego wybrano do badań ten typ i model robota?

3. Na str. 57 stwierdzono, że „Spełnienie wyżej podanych wymagań (wcześniej określono je w tekście) pozwoli na oferowanie jednej konstrukcji podstawy robota Delta do różnych

modeli/wielkości oraz do różnych zastosowań, klientów i linii produkcyjnych". Badania prowadzono na jednym modelu, zatem powstają wątpliwości, czy takie uogólnienie będzie możliwe.

4. Formułując hipotezę badawczą (str. 57) stwierdzono, że możliwa będzie efektywna minimalizacja drgań poprzez zastosowanie podstawy mocującej robota o odpowiednio dobranych własnościach dynamicznych. Czy nie następuje tu (jeszcze przed badaniami) przypuszczenie, że efektywne będą tylko pasywne metody tłumienia drgań? Wcześniej po przeglądzie literatury (str. 53/54) stwierdzono, że „Wielce interesujące wydaje się zatem podjęcie próby implementacji wybranych technik aktywnego i pasywnego tłumienia drgań...".

5. W podrozdziale 3.1 przedstawiono projekt konstrukcyjny podstawy robota. Na jakiej podstawie zaprojektowano ramę o przedstawionych w pracy kształcie i wymiarach?

6. Na str. 69 opisując redukcję wymiarowości modelu fundamentalnego o 98% stwierdzono, że średnia różnica między modelem pełnym a modelem zredukowanym w obu analizowanych wariantach była mniejsza niż 1%, co ma znikomy wpływ na dokładność modelu. Na jakiej podstawie sfomułowano to stwierdzenie?

7. Na Rysunku 6.2 (str. 98) przedstawiono porównanie funkcji receptancji belki stalowej i belki wypełnionej polimerobetonem elastomerowym E01 oraz porównanie receptancji belki o największym spadku dominującej amplitudy rezonansowej M05. Belka stalowa miała grubość ścianki 3 mm i była w środku pusta. Czy wiadomo jakie byłyby właściwości belki stalowej pełnej? Ponadto, czy zaprezentowane na rys. 6.2 wyniki to efekt jednego, czy większej liczby pomiarów? Czy był określany rozrzut wyników?

8. Na str. 104 stwierdzono, że „Na podstawie prezentowanych wyników symulacji podjęto decyzję o zastosowaniu tłumika pasywnego w rzeczywistej konstrukcji ramy poprzez zalanie kolumn ramy polimerobetonem do wysokości 53 cm od dołu". Na jakiej podstawie określono przedstawioną wartość liczbową określającą wysokość zalania kolumn ramy polimerobetonem? Przedstawione wyniki symulacji nie wskazują na konkretną wartość liczbową.

9. Na rys. 6.16 (str. 110) przedstawiono porównanie wybranych funkcji receptancji w punkcje P2, wyznaczonych z modelu MES i eksperymentalnie, na kierunkach X oraz Y. Na podstawie analizy wykresów stwierdzono, że dla celów oceny skuteczności działania pasywnego eliminatora drgań uzyskano zadowalającą dokładność modelu. Jest to analiza jakościowa, dlaczego nie przeprowadzono w tym przypadku dokładniejszej analizy liczbowej?

10. Na str. 116 stwierdzono, że „dostępna aparatura pomiarowa w ZUT nie daje możliwości jednoczesnych pomiarów przebiegów czasowych przemieszczeń chwytaka robota z możliwością rozdzielenia drgań od ruchów kinematycznych i określenia błędów złożonych trajektorii robota Delta o dużej dynamice ruchu". Wyniki testów na podstawie których sformułowano cytowany wniosek nie są zawarte w pracy. Bazując na przedstawionym wniosku podjęto decyzję, że o skuteczności działania układu pasywnej eliminacji drgań będzie wnioskowane na podstawie pomiaru drgań konstrukcji ramy w dziedzinie czasu z zastosowaniem wibrometru laserowego i czujników akcelerometrycznych. Czy analizowano ewentualne niedokładności wynikające z takiego podejścia?

11. Na str. 130 stwierdzono, że „Na rys. 8.2 zaprezentowano zestawienie wyników badań symulacyjnych…". Z kolei w podpisie rysunku wskazano, że są to wyniki badań eksperymentalnych.

12. We wnioskach dotyczących doktoratu wdrożeniowego stwierdzono (str. 137), że na podstawie badań reprezentatywnego modelu M3iA/6A przygotowane zostaną ramy dla całej serii robotów Delta. Jest to zapewne kierunek dalszych prac, należy zwrócić jednak uwagę, że uogólnienie wyników wykonanych badań na inne modele niesie ze sobą ryzyko mniejszej od stwierdzonej efektywności tłumienia drgań.

Wskazane uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym, chociaż obniżają nieco wartość pracy, to nie wpływają na ostateczną, pozytywną jej ocenę.

III. Podsumowanie i wniosek końcowy

W pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Jakuba Grabca podjęto i rozwiązano oryginalny problem naukowy związany z określeniem poprzez badania numeryczno-eksperymentalne właściwości dynamicznych podstaw mocujących dla wybranego typu robota przemysłowego, analizą ich wpływu na jakość pracy robotów oraz z opracowaniem skutecznej metody minimalizacji drgań systemu podstawa-robot-obiekt manipulowany. Ponadto wskazywane oryginalne wyniki badań naukowych zostały wdrożone w sferze gospodarczej.

Autor rozprawy rozwiązał oryginalny problem naukowy, wdrożył wyniki badań, wykazał się także umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawowe, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) stawiane Kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuję zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.