dr hab. inż. Marcin Chodźko, prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki

Szczecin 31 sierpnia 2026

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Pietruś nt.

„Badanie wpływu konfiguracji robota przemysłowego na drgania rezonansowe"

1. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, prof. dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta (dokument: RM-530-03-01/2026 z dnia 26 czerwca 2026 r.)

Recenzowana rozprawa liczy 151 stron. Jej treść podzielona jest na 9 głównych rozdziałów. Ponadto zawiera ona wykaz użytych oznaczeń, cztery dodatki oraz wykaz powoływanej literatury, spisy ilustracji i tabel.

Rozdział pierwszy to bardzo krótki wstęp, pomagający czytelnikowi w zapoznaniu się z tematyką rozprawy.

Zasadniczą część pracy rozpoczyna rozdział drugi nazwany: Analiza istniejących rozwiązań. Sam tytuł tego rozdziału wydaje się dość enigmatyczny. Autorka podzieliła ten rozdział na sekcje (bez stosowania dodatkowej numeracji), nazwane kolejno: Metody budowy modeli robotów, Rodzaje drgań występujących w robotach przemysłowych, Przegląd metod identyfikacji modalnej robotów, Metody pomiaru drgań. Stanowią one de facto przegląd stanu zagadnienia, przy czym każda ze wspomnianych sekcji jest od siebie niezależna. Sekcja pierwsza dotyczy metod budowy modeli robotów i opisuje różne aspekty modelowania, specyficzne dla struktur szeregowych, jakimi są w większości roboty przemysłowe. Powołując się na liczne źródła literaturowe wykazano, że tematyka modelowania robotów przemysłowych z uwzględnieniem podatności ich przegubów oraz członów jest aktualna. Sekcja druga dotyczy rodzajów drgań występujących w robotach przemysłowych. Należy zaznaczyć, że zasadniczo drgania mają taki sam charakter niezależnie od tego, czy analizujemy je w kontekście robotów przemysłowych, obrabiarek CNC czy innych struktur. Zatem rozdział ten zawiera w istocie opis podstawowych rodzajów drgań z powołaniem się na źródła literaturowe, w których były one opisywane w kontekście robotów przemysłowych. Ta, jak i kolejna sekcja tego rozdziału ma charakter przeglądowy. Sekcja trzecia – przegląd metod identyfikacji modalnej robotów ma zbliżony cel. Omówiono w niej, już nieco szerzej, podstawowe typy analizy modalnej. Odniesiono się przy tym zarówno do podstawowych jej rodzajów, jak podano przykłady wykorzystania analizy modalnej do identyfikacji właściwości dynamicznych robotów przemysłowych. Sekcja czwarta – metody pomiaru drgań kończy ten rozdział przywołując źródła

literaturowe dotyczące różnych metod pomiaru drgań podczas badań identyfikacyjnych robotów. Tu ponownie należy zaznaczyć, że metody te nie różnią się właściwie niczym, niezależnie od tego, czy stosujemy je w trakcie badań identyfikacyjnych robotów przemysłowych, czy innych struktur.

Podsumowując ten rozdział; dla osoby niezaznajomionej z tematyką może być cenny, w mojej ocenie jednak Autorka nie dość dobitnie wykazała, na czym ma polegać dysertabilność jej pracy, poprzez wskazanie niszy badawczej. Wątek ten jest rozwinięty dopiero w rozdziale trzecim podczas opisu motywacji podjęcia tematu pracy. Rozdział trzeci zatytułowany: Motywacja, cel i zakres pracy, zawiera ponadto wyszczególnienie oryginalnych elementów pracy. Podkreślono, że motywacją do podjęcia badań są doświadczenia wynikające z praktyki przemysłowej. Pojawia się w tym miejscu pewna nieścisłość; bowiem nie jest dla mnie jasne, co oznacza sformułowanie „niestabilności o charakterze drganiowym". Czy chodzi tu o powstawanie drgań samowzbudnych w procesie obróbki, czy może o drgania parametryczne (mode coupling), powstające silne drgania rezonansowe, czy może inne zjawisko?

Cele pracy sformułowano poprawnie. Pewną niekonsekwencję stanowi zamienne używanie częstotliwości rezonansowych i własnych. Nie do końca jest dla mnie jasne, w jaki sposób jest realizowane i przedstawione w pracy badanie jakości modelu matematycznego, który pozwala na predykcję właściwości drganiowych robota – na marginesie, sformułowanie „właściwości drganiowe" jest moim skromnym zdaniem, niefortunne. Zakres pracy opisano właściwie, zaś do oryginalnych elementów pracy przejdę w dalszej części recenzji.

Rozdział czwarty zatytułowany został – Model robota. Taka jest też zawartość tego rozdziału. Przedstawiono w nim model kinematyki robota IRB 1600. Układy współrzędnych przyjęto zgodnie z notacją Denavita-Hartenberga, zaś równania opisujące zachowanie dynamiczne robota zbudowano z użyciem równań Eulera Lagrange'a. W efekcie, otrzymano zestaw równań pozwalających na wyznaczenie częstości drgań własnych oraz postaci drgań. Model, oprócz struktury, wymaga znajomości parametrów. Tym też Autorka pracy zajęła się w podrozdziale 4.4. Moim zdaniem, ten podrozdział powinien być znacznie bardziej rozbudowany/obszerny. Wiarygodność uzyskiwanych w późniejszym etapie wyników, czy też ocena poprawności/zgodności modelu, silnie zależy od poprawności oszacowania jego parametrów. Proces ten niezwykle rzadko odbywa się w jednym podejściu, a końcową zgodność, lepszą lub gorszą, otrzymuje się po wielokrotnych iteracjach. W pracy nie zostało to dostatecznie dokładnie opisane; nie twierdzę, że tak nie było, zwracam wyłącznie uwagę na brak wspomnianego opisu.

Rozdział piąty zatytułowano – Rozwiązanie analityczne. Kolejny rozdział o dość „domyślnym" tytule. Widzę, że taki jest styl Autorki, pociesza konsekwencja w jego stosowaniu. Wykorzystując wartość parametrów, oszacowanych na podstawie badań, a przedstawionych w tabeli 4.2, Autorka używając podstawowych równań stosowanych w opisie dynamiki układów, wyznacza częstości własne modelu robota. Ciekawym podejściem i pomysłem na wizualizację właściwości dynamicznych jest przedstawienie zarówno zmian wartości kolejnych częstości własnych dla określonych wartość jednego kąta, w funkcji innego i dalej postaci drgań, im odpowiadających. Bardzo intuicyjne i warte podkreślenia. Ostatecznie uzyskujemy najciekawsze zilustrowanie właściwości dynamicznych robota w postaci rysunków od 5.12 do rysunków 5.16. Pełne zilustrowanie

wszystkich postaci drgań przy każdym kątowym położeniu poszczególnych członów robota zajęłoby zbyt dużo miejsca. Chciałoby się zaproponować napisanie programu, animującego te postacie, z możliwością zmian wspomnianego położenia kątowego.

Rozdział szósty zatytułowano Analiza numeryczna drgań. Przedstawiono w nim wykresy przedstawiające widma częstotliwościowe drgań członów robota w funkcji współrzędnej β_2 wraz z opisem. W mojej ocenie zabrakło w tym rozdziale opisu metodyki wybranej do analizy numerycznej drgań, pojawiają się również niezręczności pisarskie i niejasności – by wspomnieć zdanie: „...Może to wskazywać na większą stabilność dynamiczną tej części robota w szerokim zakresie konfiguracji" – strona 67.

Rozdział siódmy został zatytułowany Badania eksperymentalne. Treść tego rozdziału zawiera informacje na temat obiektu badanego, zastosowanej aparatury pomiarowej z podaniem jej podstawowych parametrów. Dwa podrozdziały – Pomiar przyspieszeń drgań robota oraz Wizyjny pomiar drgań robota, zawierają więcej informacji dotyczących wyników pomiarów - głównie charakterystyk, z podaniem ich interpretacji. Wizyjny pomiar drgań ramienia robota – czyli podrozdział 7.3 to próba walidacji modelu analitycznego poprzez wskazanie częstości własnych, a następnie animację postaci drgań odpowiadających tym częstotliwościom.

Rozdział ósmy, został zatytułowany Analiza wyników. Po zdefiniowaniu wskaźnika (równanie 8.1), na podstawie którego oceniana jest dokładność odwzorowania przez model rzeczywistej wartości częstości własnej. Na kilku rysunkach i histogramach przedstawiono wartości liczbowe i opatrzono dość ogólnym komentarzem. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku postaci drgań.

Rozdział dziewiąty, to krótkie podsumowanie, wnioski oraz określenie kierunków dalszych prac.

2. Ocena merytoryczna pracy

2.1. Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

W pracy podjęto tematykę, mającą swoje źródła w praktyce przemysłowej. Zagadnienia dostatecznej sztywności układu nośnego klasycznych obrabiarek, w rozumieniu ich struktury kinematycznej, wydają się rozwiązane. Dodatkowo, w przypadku bardzo specyficznych zastosowań, możliwe jest wprowadzenie dodatkowych układów kompensacji, uwzględniania map odchyłek w układzie sterowania, stosowania układów aktywnych, systemów diagnostycznych, umożliwiających aktywne lub semi-aktywne ingerowanie w proces, by zapewnić jego stabilność i optymalny efekt obróbki.

W przypadku nietypowych zastosowań, wymuszających zastosowanie struktur o większej podatności, w porównaniu do klasycznego układu korpusowego obrabiarki, trudności mają odmienny charakter. Dotyczy to nie tylko robotów realizujących zadania obróbkowe, lecz również operacji manipulacyjnych, często przy dużych wysięgach ramion. Ugięcia w węzłach dominują względem odkształceń członów, jest tak przynajmniej w większości zastosowań robotów przemysłowych. Pewnym niedociągnięciem jest brak sprawdzenia, jak ma się sytuacja w przypadku analizowanego robota IRB 1600/1.45, przyjęto natomiast a priori założenie sztywności członów. Sam problem modelowania właściwości dynamicznych dowolnej struktury, jest za każdym razem wymagający i pracochłonny. Jest to najczęściej iteracyjny proces, który dla poprawnie określonej struktury modelu,

prowadzi do uzyskania możliwie małej rozbieżności pomiędzy wynikami modelowania matematycznego, a wynikami doświadczeń. Praca stanowi próbę rozwiązania bardzo skomplikowanego problemu, po przyjęciu znaczących uproszczeń, do których odniosę się w kolejnej części recenzji.

2.2. Realizacja badań i uzyskane rezultaty

Temat podjęty przez Autorkę nie jest prosty. Dotyczy bowiem modelowania. Model powinien być na tyle prosty, na ile może i na tyle skomplikowany, na ile powinien być. Innymi słowy, modelując jakiekolwiek zjawisko bądź obiekt, jesteśmy zmuszeni do dokonywania uproszczeń zależnie od celu, jaki ma pełnić ostatecznie, zbudowany przez nas model.

W analizowanym przypadku mamy trzy podstawowe trudności, związane ze zbudowaniem poprawnego modelu robota. Pierwszym jest redukcja liczba stopni swobody. Motywacja podjęcia tematu wynika z praktyki przemysłowej; Autorka analizuje układ płaski. Brak mi w pracy analizy adekwatności prowadzonych analiz. Sam proces skrawania nie jest „płaski", dodatkowo pojawiają się zagadnienia sprzężenia zwrotnego przez ten proces i całe zagadnienie mocno się komplikuje.

Drugim aspektem jest obecność układu sterowania. Temat ten jest podejmowany w literaturze od lat. Układ sterowania, w dużym uproszczeniu, stara się utrzymać pozycję (minimalizacja uchybu). Test impulsowy „wytrąca" z równowagi taki układ, który odpowiada w określony sposób, lecz w trakcie tego ruchu układ sterowania ciągle stara się zminimalizować ruch; utrzymać pozycję. Na ile uzasadnione jest, wobec tego wykorzystanie narzędzi liniowej analizy modalnej? Czy nie popełniamy istotnego błędu?

Trzecim problemem jest brak uwzględnienia tłumienia w układzie. Samo przyjrzenie się funkcjom przejścia daje informację o znaczącym tłumieniu. Rozumiem, że rozwiązywanie zagadnienia własnego bez tłumienia jest mniej skomplikowane. Warto jednak odnieść się do tego problemu i poddać go dyskusji.

Pragnę podkreślić, że uwagi te dotyczą pracy, która być może została wykonana, jednak nie znalazła odzwierciedlenia w tekście rozprawy.

Biorąc to pod uwagę chcę stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty. Tak, jak zakładano, zbudowano model robota, wyznaczono częstości drgań własnych oraz wyznaczono postacie drgań przy tych częstościach. Wyniki walidowano, porównując z rezultatami eksperymentu (pomiar wizyjny). Pewne wątpliwości budzi użyteczność tego modelu w docelowej, optymalizacji procesu technologicznego. Jednak chce podkreślić, że etap modelowania, już po przyjęciu uproszczeń, wykonano poprawnie, a wyniki badań zaprezentowano czytelnie.

2.3. Strona edytorska i redakcyjna pracy

Praca napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem. Można wychwycić kilka „niezręczności" językowych. Przykładowo:

- str. 87: „... częstotliwość ta utrzymuje się na stałym poziomie w całym rozpatrywanym..."

- str. 92: „... przemieszczenia wybranych punktów, których długości są proporcjonalne do długości strzałek"

W przypadku recenzowanej pracy nie umniejszają jej wartości. Układ pracy jest poprawny, Literatura jest przywołana poprawnie, choć moim zdaniem nadmiarowo. 142 pozycje, wliczając w to odnośniki do stron internetowych, to znacząca liczba, moim zdaniem niewymagana do realizacji pracy w przedstawionym zakresie. W zdecydowanej większości pozycje są aktualne, co pozytywnie wpływa na ocenę aktualności podjętej tematyki badawczej. Wzory umieszczone w pracy w dość znaczącej liczbie są czytelne, rysunki również. Nie znalazłem żadnych istotnych błędów edytorskich.

2.4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Każda praca naukowa skłania do refleksji, budzi wątpliwości oraz stanowi punkt wyjścia do kolejnych działań i wyznaczania nowych kierunków badań. W tym kontekście, chciałbym sformułować kilka uwag krytycznych i dyskusyjnych, które ostatecznie nie wpływają negatywnie na ocenę rozprawy. Chciałbym jednak, by Autorka możliwie dokładnie odniosła się do nich na piśmie, a po uzyskaniu konsensusu, uwzględniła przy opracowywaniu prezentacji swojej dysertacji.

1. Autorka, motywując podjęcie swoich prac, wspomniała, iż wynikają one z obserwacji zjawisk zachodzących w trakcie obróbki. Nie do końca zrozumiałe jest dla mnie sformułowanie: „niestabilności o charakterze drganiowym". Proszę o rozwinięcie tego wątku – z jakimi konkretnie problemami mierzono się w trakcie obróbki? Czy drgania miały charakter drgań samowzbudnych (skoro wspomina się o niestabilnościach), czy też zupełnie inny? Ponadto, jak Autorka ocenia użyteczność wyników swoich analiz w tym kontekście?
2. Drugi cel pracy zawiera moim zdaniem nieścisłość. Jeśli mówimy o budowaniu modelu modalnego, zwykle mówimy o częstotliwościach własnych, postaciach drgań oraz tłumieniu modalnym. Zjawisko rezonansu może wcale nie wystąpić, bowiem zależy od częstotliwości, z jaką działa siła wymuszająca, w uproszczeniu. Proszę o ustosunkowanie się do tej uwagi i doprecyzowanie, dlaczego w całej rozprawie te dwa pojęcia stosowane są, można uznać, zamiennie?
3. Trzeci cel pracy zawiera sformułowanie mówiące o badaniu jakości modelu matematycznego oraz o „predykcji właściwości drganiowych robota". Moje pytanie jest następujące: w jaki sposób badano jakość modelu oraz na czym ma polegać/polegała wspomniana predykcja właściwości robota?
4. W rozdziale 3.4 wspomina się o cyt.: „obszarze przestrzeni roboczej, w której nie nastąpi zsynchronizowanie częstości *rezonansowych* z częstotliwościami wymuszeń". Sugeruje to, iż problemem były drgania wymuszone. Jednak w treści rozprawy często pojawia się pojęcie stabilności robota. Który z tych mechanizmów jest bardziej niebezpieczny dla badanego przypadku oraz czy możliwe jest, zdaniem Autorki, manipulowanie wyłącznie konfiguracją robota w celu uniknięcia zjawiska rezonansu? Przecież konfiguracja członów wynika z konkretnych zadań

manipulacyjnych bądź obróbkowych. Infantylnie mówiąc, jeśli naszym celem będzie „pomalowanie sufitu", to nie będziemy schylać się ku podłodze.

5. W rozdziale 4. na stronie 37. zawarto stwierdzenie, mówiące o tym, że obciążenie od sił grawitacji w bardzo małym stopniu wpływa na wektor β. Proszę o rozwinięcie tego wątku i pełniejsze uzasadnienie.
6. Rozdział 4.4 jest w mojej ocenie potraktowany zbyt pobieżnie. Uprzejmie proszę o szersze odniesienie się do zastosowanej metodyki badawczej. Wartości parametrów – Tabela 4.2, wpływają bowiem bezpośrednio na ocenę dokładności rezultatów modelowania.
7. Rozdział 5 (strona 58) zawiera sformułowanie „... konfiguracji odpowiadających wysokim wartościom postaci drgań" Proszę o wyjaśnienie, co Autorka miała tu na myśli.
8. Rozdział 6 – Analiza numeryczna drgań, nie zawiera żadnych informacji dotyczących sposobu wyznaczania rozwiązania modelu, zbudowanego w oparciu o równanie (4.58). W rozdziale tym, na stronie 57 pojawia się również sformułowanie: „Może to wskazywać na większą stabilność dynamiczną tej części robota w szerokim zakresie częstotliwości". Proszę o wyjaśnienie, co Autorka miała tymi słowami na myśli?
9. Rozdział 7 wymaga szerszego komentarza. Przede wszystkim pewne wątpliwości budzi metodyka badań. Po pierwsze, Autorka stosuje jedną z odmian eksperymentalnej analizy modalnej – test impulsowy. Brakuje mi już na wstępie tego rozdziału jakiejkolwiek dyskusji na temat spełnienia podstawowych założeń analizy modalnej: liniowości, stacjonarności, spełnienia zasady wzajemności. Po drugie: umiejscowienie wyłącznie jednego czujnika na końcówce mogłoby być uzasadnione, gdyby chodziło o identyfikację funkcji przejścia w miejscu styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, np. w celu budowy krzywych workowych (określenia obszarów tzw. stabilności). W rozprawie, nie było to jednak przedmiotem analiz. Ponadto, sformułowanie na stronie 79, cyt.:"... zaznaczono wartości częstotliwości drgań najbardziej zbliżone do wartości kolejnych częstotliwości własnych ..." poddaje w wątpliwość, co jest punktem odniesienia – wyniki analiz numerycznych, czy eksperyment? Na niektórych rysunkach np. 7.14 pojawia się maksimum funkcji przejścia przy około 28 Hz. Czy jest to częstotliwość odpowiadająca fizycznej postaci drgań? Autorka podaje wyjaśnienie pisząc o ruchu całego obiektu. Na jakiej podstawie Autorka formułuje taki wniosek? Proszę o wyjaśnienie, dlaczego tak mocno „okroiła" eksperyment identyfikacyjny?
10. Podrozdział 7.3 rozpoczyna się od stwierdzenia, że wykonanie wielopunktowych pomiarów jest kłopotliwe. Nie zgodzę się z tą tezą, wykonanie testu impulsowego z kilkoma kierunkami i punktami wymuszeń oraz pomiarem odpowiedzi w kilkudziesięciu, jeśli nie setkach punktów pomiarowych nie stanowi obecnie najmniejszego problemu. Do oceny postaci drgań wybrano jednak pomiar wizyjny. Nie deprecjonuję tej metody, stanowi świetny wybór do szybkiej oceny charakteru ruchu. Wystarczy jednak spojrzeć na widma (rysunek 7.26 lub rysunek 7.29), by zauważyć istotną różnicę pomiędzy czytelnością danych pomiarowych, co przekłada się na trudności interpretacyjne.
11. Rozdział 8, zawierający zdania (strona 106) cyt.: „Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę charakteru drgań własnych robota oraz identyfikację elementów podatnych na odkształcenia. .... Mogą stanowić podstawę do optymalizacji procesów

zrobotyzowanych ze względu na drgania". Pomijając składnię, proszę o informację, co Autorka chciała tu przekazać. Nie była analizowana bowiem odkształcalność członów oraz na czym ma polegać wspomniana optymalizacja?

12. W podsumowaniu Autorka podała uzasadnienie dotyczące „błędów względnych" podając za ich przyczynę pominięcie efektów tłumienia, nieliniowości konstrukcji lub zakłóceń pomiarowych. Proszę o doprecyzowanie, na jakiej podstawie zostały sformułowane te zdania?

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

W pracy doktorskiej autorstwa Pani mgr inż Pauliny Pietruś podjęto i rozwiązano oryginalny problem naukowy, związany z modelowaniem dynamiki robota przemysłowego. Problem ten został rozwiązany z użyciem metod analitycznych oraz numerycznych, wspomaganych badaniami doświadczalnymi.

Autorka, podejmując się tego zagadnienia, właściwie określiła obszar badawczy, poprawnie postawiał cele pracy, osiągnęła je wykazując się 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. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.), stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuję zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

