dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. AGH
Katedra Automatyzacji Procesów
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, H-B1B2, I p., pok.108.4
jaroslaw.konieczny@agh.edu.pl

Kraków, 21. 09.2026 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pauliny Pietruś
pt. „Badanie wpływu konfiguracji robota przemysłowego na drgania rezonansowe”

a) Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Pietruś, zatytułowana „Badanie wpływu konfiguracji robota przemysłowego na drgania rezonansowe”, została przygotowana na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki. Praca powstała pod opieką naukową dr. hab. inż. Piotra Gierlaka, prof. uczelni, pełniącego funkcję promotora, oraz dr. hab. inż. Dariusza Szybickiego, prof. uczelni, pełniącego funkcję promotora pomocniczego.

Podstawą opracowania recenzji jest powołanie recenzenta dokonane przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza na posiedzeniu w dniu 17 czerwca 2026 r., przekazane pismem z dnia 26 czerwca 2026 r., znak RM-530-03-02/2026, oraz umowa zawarta pomiędzy Politechniką Rzeszowską im. Ignacego Łukasiewicza a recenzentem. Sporządzenie recenzji powierzono zgodnie z art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, a także zgodnie z właściwymi przepisami wewnętrznymi Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dotyczącymi postępowań w sprawie nadania stopnia doktora.

b) Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Treść rozprawy ściśle koresponduje z jej tytułem. Praca dotyczy wpływu konfiguracji kinematycznej robota przemysłowego na jego właściwości dynamiczne, w szczególności na częstotliwości własne i formy drgań. Zarówno analiza stanu wiedzy, jak i części modelowa, analityczna, numeryczna oraz eksperymentalna koncentrują się na zagadnieniach modelowania dynamiki robotów o podatnych złączach, identyfikacji częstotliwości i postaci drgań własnych oraz ocenie zależności tych wielkości od ustawienia poszczególnych członów robota. Rozprawa została przygotowana w języku polskim jako spójne opracowanie monograficzne.

Rozprawa ma logiczną i zasadniczo dobrze przemyślaną strukturę, prowadzącą od przedstawienia problematyki badawczej i aktualnego stanu wiedzy, przez sformułowanie celów pracy oraz opracowanie modelu matematycznego, do analitycznego rozwiązania jego liniowej postaci, numerycznego rozwiązania pełniejszych równań ruchu, walidacji eksperymentalnej oraz sformułowania wniosków.

Rozdział 1, „Wstęp”, wprowadza w problematykę zastosowania robotów przemysłowych oraz wskazuje na ich mniejszą sztywność w porównaniu z klasycznymi obrabiarkami CNC. Przedstawiono znaczenie analizy modalnej w ocenie właściwości dynamicznych robotów oraz uzasadniono potrzebę uwzględnienia podatności połączeń w modelowaniu zjawisk drganiowych.

Rozdział 2, „Analiza istniejących rozwiązań", zawiera przegląd metod modelowania dynamiki robotów, ze szczególnym uwzględnieniem modeli sztywnych, modeli z podatnymi złączami lub członami oraz modeli mieszanych. Omówiono również rodzaje drgań występujących w robotach przemysłowych, metody identyfikacji modalnej oraz metody pomiaru drgań kontaktowe, bezkontaktowe i pośrednie. Przegląd literatury prowadzi do wskazania obszaru badawczego związanego z oceną wpływu konfiguracji robota, podatności jego połączeń oraz dodatkowego osprzętu na właściwości drganiowe układu.

Rozdział 3, „Motywacja, cel i zakres pracy", przedstawia praktyczne przesłanki podjęcia badań, wynikające z problemów drganiowych obserwowanych podczas realizacji zrobotyzowanych procesów obróbki mechanicznej. Sformułowano główny cel pracy, cele szczegółowe i jej zakres, a także wskazano elementy uznane przez Autorkę za oryginalne osiągnięcia.

Rozdział 4, „Model robota", zawiera założenia modelowe oraz opis kinematyki i dynamiki badanego układu. Przyjęto płaski model obejmujący trzy człony ramienia, system mocowania czujnika, czujnik siły i momentu oraz narzędzie, z uwzględnieniem podatności wybranych połączeń. Kinematykę opisano z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga, natomiast równania ruchu wyprowadzono na podstawie formalizmu Eulera-Lagrange'a.

Rozdział 5, „Rozwiązanie analityczne", dotyczy wyznaczania częstotliwości własnych oraz odpowiadających im postaci drgań. Po przyjęciu odpowiednich uproszczeń i linearyzacji równań ruchu sformułowano zagadnienie własne. Przeanalizowano również względne amplitudy drgań poszczególnych członów w kolejnych postaciach drgań.

Rozdział 6, „Analiza numeryczna drgań", przedstawia numeryczne rozwiązanie pełniejszych równań ruchu, uwzględniających zależność macierzy bezwładności od współrzędnych drganiowych oraz człony związane z siłami Coriolisa i odśrodkowymi. Na podstawie uzyskanych przebiegów i ich widm częstotliwościowych oceniono wpływ konfiguracji robota na częstotliwości własne oraz amplitudy drgań jego poszczególnych członów.

Rozdział 7, „Badania eksperymentalne", zawiera opis stanowiska badawczego i zastosowanych procedur pomiarowych. Badania przeprowadzono dla różnych konfiguracji robota, wykorzystując pomiary akcelerometryczne i wzbudzenie młotkiem modalnym. Uzupełnieniem badań były pomiary wizyjne umożliwiające obserwację postaci drgań i porównanie wyników uzyskanych za pomocą dwóch niezależnych metod pomiarowych.

Rozdział 8, „Analiza wyników", obejmuje porównanie częstotliwości rezonansowych wyznaczonych na podstawie rozwiązania uproszczonego liniowego modelu oraz symulacji numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Porównano również postaci drgań wynikające z modelu z rezultatami pomiarów wizyjnych.

Rozdział 9, „Podsumowanie", przedstawia syntezę uzyskanych wyników i najważniejsze wnioski dotyczące wpływu konfiguracji robota na jego właściwości drganiowe. Autorka odnosi się do stopnia realizacji celu pracy oraz wskazuje kierunki dalszych badań.

Bibliografia obejmuje 142 pozycje. W czterech Dodatkach zamieszczono szczegółowe wyniki obliczeń, zestawienia błędów względnych dla wyników analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych oraz wartości współczynników opisujących postaci drgań. Przeniesienie rozbudowanych zależności matematycznych i obszernych zestawień liczbowych do dodatków zwiększa czytelność zasadniczej części rozprawy, zachowując możliwość szczegółowej weryfikacji przeprowadzonych obliczeń.

Układ rozprawy należy ocenić pozytywnie. Poszczególne rozdziały są logicznie powiązane, a ich sekwencja odpowiada kolejnym etapom rozwiązywania problemu badawczego. Struktura rozprawy jest przejrzysta i właściwie podporządkowana realizacji przyjętego celu badawczego.

c) Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Bibliografia rozprawy obejmuje 142 pozycje. Zawiera publikacje dotyczące dynamiki i modelowania robotów przemysłowych, układów z podatnymi złączami i członami, analizy modalnej, identyfikacji parametrów dynamicznych, pomiarów drgań oraz zastosowania robotów w procesach obróbki mechanicznej. Uwzględniono również piśmiennictwo z zakresu metod optymalizacyjnych, technik uczenia maszynowego oraz numerycznego i eksperymentalnego wyznaczania właściwości dynamicznych konstrukcji. Dobór literatury jest adekwatny do tematu rozprawy i obejmuje zarówno klasyczne opracowania stanowiące podstawę zastosowanych metod, jak i liczne aktualne publikacje dotyczące zależności właściwości drganiowych robotów od ich konfiguracji. Na podkreślenie zasługuje uwzględnienie prac opublikowanych w ostatnich latach, co wskazuje na znajomość współczesnych kierunków badań, w szczególności w obszarze zrobotyzowanej obróbki mechanicznej, identyfikacji modalnej i predykcji drgań.

Literatura została wykorzystana nie tylko do przedstawienia stanu wiedzy, lecz także do uzasadnienia przyjętych założeń modelowych, wyboru metod badawczych oraz interpretacji uzyskanych wyników. Autorka przywołuje również własną publikację, bezpośrednio związaną z tematyką rozprawy i dotyczącą wpływu konfiguracji manipulatora na zjawiska drganiowe. Uzupełnienie bibliografii stanowią materiały techniczne producentów aparatury i badanego robota. Są one właściwe jako źródła danych technicznych, powinny jednak zostać wyodrębnione od recenzowanej i autoryzowanej literatury naukowej.

Zastosowane piśmiennictwo należy ocenić pozytywnie. Jest ono obszerne, tematycznie zróżnicowane i zasadniczo aktualne, a jego dobór świadczy o dobrej znajomości przez Autorkę stanu wiedzy w zakresie dynamiki, modelowania i badań drganiowych robotów przemysłowych.

d) Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydatki

Celem realizacji rozprawy było sformułowanie modelu matematycznego robota przemysłowego ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska drgań mechanicznych.

Cele szczegółowe obejmowały:

i. Sformułowanie analitycznego modelu drgań ramienia robota uwzględniającego podatność złączy, systemu mocowania narzędzia i czujnika siły.
ii. Analizę właściwości dynamicznych robota, obejmującą zjawiska drganiowe, na podstawie sformułowanego modelu analitycznego, w szczególności wyznaczenie częstotliwości rezonansowych, postaci drgań oraz ocenę wpływu konfiguracji robota na te wielkości.
iii. Badanie jakości modelu matematycznego opisującego główne zjawiska fizyczne, w celu określenia możliwości jego wykorzystania w szybkiej analizie dynamicznej i predykcji właściwości drganiowych robota.
iv. Eksperymentalne badania walidacyjne opracowanych modeli robota obejmujące pomiary odpowiedzi dynamicznych układu oraz porównanie wyników eksperymentalnych z rezultatami uzyskanymi na drodze modelowania analitycznego i numerycznego.

Cel pracy został sformułowany jasno i pozostaje zgodny z jej tytułem oraz przedstawioną luką badawczą. Ma on zarówno znaczenie poznawcze, związane z opisem wpływu konfiguracji robota na częstotliwości i postaci drgań, jak i znaczenie praktyczne, ponieważ opracowany

model może wspomagać wybór obszaru przestrzeni roboczej ograniczającego ryzyko wystąpienia rezonansu podczas realizacji procesów technologicznych. Zakres celów szczegółowych tworzy logiczny ciąg obejmujący opracowanie modelu, analizę jego właściwości, rozwiązanie równań metodami analitycznymi i numerycznymi oraz weryfikację eksperymentalną.

Przyjęty cel należy ocenić pozytywnie. Jest on istotny z punktu widzenia dynamiki robotów przemysłowych oraz ich zastosowania w procesach wymagających zwiększonej dokładności i stabilności dynamicznej. Cel został zasadniczo osiągnięty poprzez opracowanie modelu robota ABB IRB 1600/1.45, wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań dla różnych konfiguracji oraz porównanie wyników obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych. Należy jednak zaznaczyć, że przeprowadzona walidacja dotyczyła ograniczonego zakresu konfiguracji robota, a ilościowa zgodność modelu z eksperymentem była zróżnicowana w zależności od rozpatrywanej częstotliwości i postaci drgań. Ograniczenia te nie podważają realizacji celu pracy, lecz wyznaczają zakres stosowalności przedstawionych wyników oraz uzasadniają wskazane kierunki dalszych badań.

e) Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

W rozprawie użyto metod badawczych obejmujących modelowanie matematyczne, metody analityczne, symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne. Przyjęta metodyka umożliwiła zarówno teoretyczne określenie wpływu konfiguracji robota na jego właściwości dynamiczne, jak i weryfikację uzyskanych wyników na rzeczywistym stanowisku badawczym.

Podstawą badań było opracowanie **modelu matematycznego** robota przemysłowego z uwzględnieniem podatności przegubów, systemu mocowania czujnika oraz czujnika siły i momentu. Kinematykę robota opisano z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga, natomiast równania ruchu wyprowadzono na podstawie formalizmu Eulera-Lagrange'a. Parametry masowe i geometryczne modelu określono na podstawie dokumentacji technicznej, pomiarów rzeczywistego obiektu oraz własnego modelu CAD, natomiast współczynniki sztywności wyznaczono metodami eksperymentalnymi i obliczeniowymi. Przyjęte podejście należy ocenić pozytywnie, ponieważ pozwoliło uwzględnić nie tylko właściwości ramienia robota, lecz także wpływ zamontowanego osprzętu na dynamikę całego układu.

W ramach **metod analitycznych** dokonano linearyzacji równań ruchu, pomijając człony zależne od kwadratów prędkości oraz wpływ małych przemieszczeń drganiowych na macierz bezwładności. Na tej podstawie sformułowano zagadnienie własne służące do wyznaczania częstotliwości i postaci drgań w zależności od konfiguracji robota. Zaletą tej metody jest możliwość szybkiego określania właściwości modalnych dla wielu ustawień ramienia oraz bezpośrednia ocena wpływu poszczególnych współrzędnych konfiguracyjnych. Przyjęte uproszczenia ograniczają dokładność odwzorowania pełnej dynamiki układu, jednak analiza porównawcza wykazała, że wpływ pominiętych członów na wartości wyznaczanych częstotliwości był na ogół niewielki. Do opisu kinematyki modelu robota wykorzystano notację Denavita-Hartenberga.

Uzupełnieniem rozwiązania liniowego modelu były **symulacje numeryczne** pełniejszych równań ruchu, zachowujących zależność macierzy bezwładności od współrzędnych drganiowych. Równania rozwiązano dla zadanych warunków początkowych, a częstotliwości własne identyfikowano na podstawie widm uzyskanych przy użyciu przekształcenia Fouriera. Metoda ta umożliwiła ocenę wpływu uproszczeń zastosowanych przy linearyzacji oraz analizę

drgań poszczególnych członów robota. Jej zastosowanie należy uznać za zasadne, chociaż wiarygodność wyników pozostaje uzależniona od przyjętych parametrów modelu i założeń dotyczących między innymi liniowej sprężystości połączeń oraz pominięcia tłumienia.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na robocie ABB IRB 1600/1.45. Drgania wzbudzano młotkiem modalnym, a odpowiedź układu rejestrowano za pomocą akcelerometru zamontowanego na narzędziu. Pomiary wykonywano dla kolejnych konfiguracji robota, przy czym dla każdego ustawienia przeprowadzono dziesięć prób, a uzyskane widma uśredniono. Dodatkowo zastosowano system wizyjny z funkcją amplifikacji ruchu, który umożliwił identyfikację postaci drgań oraz niezależne porównanie wyników z pomiarami akcelerometrycznymi. Połączenie pomiarów akcelerometrycznych z bezkontaktowymi pomiarami wizyjnymi oraz wyznaczenie widm sygnałów są istotną zaletą przyjętej procedury.

Weryfikację modelu przeprowadzono przez porównanie częstotliwości i postaci drgań uzyskanych na podstawie obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych. Stopień zgodności częstotliwości oceniono za pomocą błędów względnych, natomiast postaci drgań porównano na podstawie stosunków amplitud przemieszczeń kątowych wybranych członów. Takie podejście pozwoliło na ilościową i jakościową ocenę poprawności modelu. Walidacja postaci drgań została jednak przeprowadzona dla ograniczonej liczby konfiguracji i obejmowała przede wszystkim trzy pierwsze postacie drgań, co należy traktować jako ograniczenie zakresu weryfikacji.

Zastosowane metody badawcze tworzą logiczny i wzajemnie uzupełniający się ciąg obejmujący opracowanie modelu matematycznego, wyznaczenie jego parametrów, rozwiązanie zagadnienia metodami analitycznymi i numerycznymi oraz walidację eksperymentalną. Szczególnie wartościowe jest zestawienie wyników modelowych z rezultatami uzyskanymi za pomocą dwóch niezależnych technik pomiarowych. Ograniczenia związane z pominięciem tłumienia, przyjęciem liniowej podatności połączeń, uproszczeniem robota do modelu płaskiego oraz walidacją w ograniczonym zakresie konfiguracji określają zakres stosowalności opracowanego modelu i wskazują kierunki dalszego rozwoju badań.

f) Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Wyniki badań przedstawiono w rozdziałach 5–8, obejmujących wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań własnych na podstawie modelu liniowego, symulacje numeryczne pełniejszej, nieliniowej postaci przyjętego modelu, badania eksperymentalne oraz porównanie rezultatów obliczeń z wynikami pomiarów.

W rozdziale 5 przedstawiono zależność pięciu częstotliwości własnych od konfiguracji robota opisanej kątami β_2 i β_3. Wykazano, że trzy pierwsze częstotliwości są bardziej wrażliwe na zmianę kąta β_2, natomiast na częstotliwości czwartą i piątą większy wpływ wywiera kąt β_3. Wyniki przedstawiono czytelnie, chociaż ich interpretacja ma miejscami charakter głównie opisowy i mogłaby zostać uzupełniona o dokładniejsze wyjaśnienie fizycznych przyczyn obserwowanych zależności. Ponadto na rysunkach 5.2–5.6 przedstawiono częstotliwości własne w funkcji kąta β_2 dla wybranych wartości kąta β_3, nie zamieszczono natomiast komplementarnych wykresów częstotliwości własnych w funkcji β_3 dla ustalonych wartości β_2. Takie zestawienie byłoby szczególnie istotne dla czwartej i piątej częstotliwości, dla których Autorka wskazuje dominujący wpływ kąta β_3. Pełniejszą formą prezentacji wyników byłyby mapy konturowe lub powierzchnie odpowiedzi $f_i(\beta_2, \beta_3)$, umożliwiające równoczesną ocenę wpływu obu współrzędnych konfiguracyjnych.

Omówiono również postaci drgań, wykorzystując względne amplitudy przemieszczeń kątowych poszczególnych członów. Stwierdzenie, że „**Układu równań (5.9) nie można jednoznacznie rozwiązać ze względu na współczynniki A_i**”, jest nieprecyzyjne. Układ ten stanowi jednorodne zagadnienie własne i dla każdej częstotliwości własnej pozwala wyznaczyć odpowiadający jej wektor własny z dokładnością do dowolnego niezerowego mnożnika. Niejednoznaczna pozostaje zatem skala wektora, a nie sama postać drgań. Przyjęta normalizacja względem A_1 sprowadza się do poszukiwania ilorazów A_2/A_1 ; A_3/A_1; A_4/A_1; A_5/A_1 co odpowiada normalizacji $A_1 = 1$.

Pierwotny wektor własny ma postać $A = [A_1 \quad A_2 \quad A_3 \quad A_4 \quad A_5]^T$. Żeby przeskalować go do postaci $\tilde{A} = \frac{A}{A_1}$, otrzymując $\tilde{A} = [1 \quad A_2/A_1 \quad A_3/A_1 \quad A_4/A_1 \quad A_5/A_1]^T$ z rozwiązania zagadnienia własnego musi wynikać, że $A_1 \neq 0$.

Jeżeli A_1 jest równy zeru lub ma bardzo małą wartość, ilorazy stają się nieokreślone albo osiągają bardzo duże wartości. Może to tłumaczyć bardzo duże wartości względnych amplitud dla niektórych konfiguracji występujące w tabelach dodatku 4. Nie muszą one oznaczać bardzo dużych fizycznych amplitud drgań. Mogą wynikać z tego, że amplituda przyjęta jako mianownik jest bliska zeru.

Bardziej uniwersalna i stabilna numerycznie byłaby normalizacja względem normy wektora, jego największej składowej albo macierzy mas.

W badaniach eksperymentalnych, w widmach przemieszczeń przedstawionych w rozdziale 7.2, zidentyfikowano dodatkową składową częstotliwościową, oznaczoną symbolem B na rysunku 7.23. Składowa ta nie występowała w wynikach modelowych i pozostawała praktycznie niezależna od kąta β_2. Autorka wiąże jej obecność z dynamiką elementów nieuwzględnionych w modelu, przede wszystkim z podatnością konstrukcji nośnej robota, przy czym przedstawione wyniki nie pozwalają na jednoznaczne potwierdzenie tego źródła. W podsumowaniu interpretacja sformułowana jest nieco ostrożniej, wymieniono kilka możliwych źródeł, bez jednoznacznego przypisania częstotliwości do podstawy robota. Autorka wskazuje tam jako możliwe źródła dodatkowej częstotliwości: element osprzętu, element mocujący, pobudzenie środowiskowe. Obserwacja ta ma znaczenie, ponieważ wskazuje jedno z możliwych źródeł rozbieżności między modelem a rzeczywistym obiektem, a zarazem ujawnia ograniczenie przyjętych założeń modelowych.

W opisie pomiarów akcelerometrycznych nie podano rzeczywistych parametrów czasowych i częstotliwościowych zastosowanego toru pomiarowego, w związku z czym trudno ocenić wiarygodność wyników. Na rysunkach 7.25 i 7.28 wartości częstotliwości oznaczono z dokładnością, która nie odpowiada zadeklarowanej rozdzielczości częstotliwościowej wynoszącej $0{,}2$ Hz. Jeżeli częstotliwości wyznaczano bezpośrednio na podstawie prążków widma FFT, powinny one być podane jako wielokrotności $0{,}2$ Hz.

Sformułowanie, że „przyspieszenia zostały dwukrotnie scałkowane, co pozwoliło uzyskać wykresy widm przemieszczeń”, jest niejednoznaczne. Należałoby wskazać, czy całkowano sygnał przyspieszenia dwukrotnie w dziedzinie czasu, a następnie wykonano transformatę Fouriera, czy też przeskalowano widmo przyspieszenia przez kwadrat częstości.

Ocena postaci drgań została przeprowadzona poprzez porównanie względnych amplitud dwóch pierwszych członów robota, uzyskanych z modelu oraz z pomiarów wizyjnych. Dla pierwszej postaci drgań błąd wyniósł około 4%, natomiast dla drugiej i trzeciej odpowiednio około 20% i 25%. Zachowano przy tym zgodność znaków ilorazów amplitud, co potwierdza jakościową zgodność kierunków ruchu członów. Walidacja postaci drgań ma jednak

ograniczony zakres, ponieważ dotyczy jednej konfiguracji robota, trzech pierwszych postaci oraz relacji między amplitudami tylko dwóch członów.

Sposób, w jaki przedstawiono efekty badań, zdecydowanie warto docenić. Wyniki uporządkowano zgodnie z przyjętą metodyką, zaprezentowano je w formie wykresów i zestawień liczbowych oraz porównano z wynikami eksperymentalnymi. Szczególnie wartościowe są: wykazanie wpływu konfiguracji robota na częstotliwości i postaci drgań, zastosowanie dwóch technik pomiarowych oraz ilościowa ocena zgodności modelu z eksperymentem.

Nie przeprowadzono analizy wrażliwości wyników na wartości współczynników sztywności, mas i momentów bezwładności, która pozwoliłaby określić, które parametry w największym stopniu odpowiadają za obserwowane błędy. Ostrożności wymaga także wniosek o bardzo dobrej dokładności modelu dla czwartej i piątej częstotliwości. Składowe te mają niewielkie amplitudy przemieszczeń, a zatem wiarygodność ich identyfikacji eksperymentalnej powinna zostać poddana szerszej ocenie.

Podsumowując, część dotycząca wyników badań jest obszerna, logicznie uporządkowana i zasadniczo poprawna. Potwierdza wpływ konfiguracji robota na jego właściwości drganiowe oraz pozwala ocenić przydatność opracowanego modelu. Interpretacja niektórych rozbieżności i wniosków dotyczących dokładności modelu powinna być jednak bardziej pogłębiona. W szczególności wskazane byłoby uwzględnienie niepewności pomiarowej, przeprowadzenie analizy wrażliwości parametrów oraz rozszerzenie walidacji postaci drgań na większą liczbę konfiguracji i członów robota.

g) Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Uzyskane wyniki mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w doborze konfiguracji i planowaniu trajektorii robotów przemysłowych, szczególnie podczas procesów technologicznych narażonych na drgania, takich jak frezowanie, wiercenie czy szlifowanie. Opracowany model umożliwia przewidywanie częstotliwości rezonansowych robota w zależności od ustawienia jego członów, co pozwala omijać obszary przestrzeni roboczej, w których częstotliwości wymuszeń technologicznych są zbliżone do częstotliwości własnych układu.

Wyniki mogą być wykorzystane do:

- ograniczania ryzyka wystąpienia rezonansu;
- zwiększania dokładności realizowanych operacji;
- poprawy jakości obrabianej powierzchni;
- zmniejszania obciążeń dynamicznych narzędzia i robota;
- wspomagania doboru parametrów procesu oraz planowania trajektorii;
- opracowania algorytmów sterowania uwzględniających zmienność właściwości dynamicznych robota.

Praktyczne wykorzystanie modelu wymaga jednak świadomości jego ograniczeń, w szczególności przyjętych ograniczeń modelowych, założenia braku kontaktu narzędzia z obrabianym przedmiotem, pominięcia dynamiki układu sterowania oraz podatności osprzętu i elementów mocujących. Obecne wyniki należy zatem traktować przede wszystkim jako podstawę do wstępnego wyboru korzystnych konfiguracji robota i dalszego rozwoju narzędzi wspomagających planowanie zrobotyzowanych procesów technologicznych, a nie jako kompletną metodę bezpośrednio gotową do zastosowania przemysłowego.

h) Informacja o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

1. Stwierdzenie, że układu równań (5.9) nie można jednoznacznie rozwiązać „ze względu na współczynniki A_i", jest niewłaściwe. Układ ten stanowi jednorodne uogólnione zagadnienie własne i dla każdej częstotliwości własnej pozwala wyznaczyć odpowiadający jej wektor własny z dokładnością do dowolnego niezerowego mnożnika. Niejednoznaczna pozostaje zatem skala wektora, a nie sama postać drgań.
2. Przyjęta normalizacja względem pierwszej składowej wektora własnego nie została dostatecznie uzasadniona. Założona normalizacja $A_1 = 1$ w rozdziale 5.2 jest poprawna jedynie lokalnie, dla takich konfiguracji i postaci drgań, dla których $A_1 \neq 0$.
   Autorka powinna:
   - sprawdzić, czy $A_1 \neq 0$ dla każdej analizowanej postaci i konfiguracji;
   - wskazać, że dzielenie przez A_1stanowi przyjęty warunek normalizacji;
   - omówić osobliwości występujące tam, gdzie A_1 jest równe lub bliskie zeru;
   - ewentualnie zastosować bardziej stabilną normalizację.

   Najbardziej uniwersalne byłoby przyjęcie normalizacji euklidesowej $A_r^T A_r = 1$, lub normalizacji względem największej składowej $\max_i | A_i | = 1$. W analizie modalnej często spotykana jest normalizacja względem macierzy mas $A^T M_0 A = 1$.
3. Na rysunkach 5.1–5.6 zastosowano mało intuicyjny układ osi. Ponieważ wykresy przedstawiają częstotliwości własne w funkcji kąta β_2, kąt ten, jako zmienna niezależna, powinien zostać umieszczony na osi odciętych, natomiast wartości częstotliwości własnych na osi rzędnych. Zamiana osi zwiększyłaby czytelność wykresów i zapewniłaby ich zgodność z podpisami oraz opisem zawartym w tekście. Uwaga ta nie dotyczy wykresów widmowych przedstawionych w rozdziałach 6 i 7, gdzie częstotliwość oraz kąt $\beta_2$stanowią dwie niezależne zmienne.
4. Na rysunkach 7.25 i 7.28 wartości częstotliwości zapisano z liczbą miejsc dziesiętnych nieuzasadnioną przez zadeklarowaną rozdzielczość częstotliwościową wynoszącą 0,2 Hz.

Uwagi szczegółowe

Błędy pisarskie :

1. Równanie (4.74): podwójny znak „++".
2. Równanie (4.95), element c_{24}: błędne indeksy, skopiowano zapis elementu c_{34}.
3. Równanie (4.95), element c_{25}: błędne indeksy, skopiowano zapis elementu c_{35}.
4. Równanie (4.95), element c_{55}: zapisano c_{522}zamiast c_{525}.
5. W drugim równaniu układu (5.9) zapisano na początku $-\omega_0^2 m_{21} A_2$, podczas gdy zgodnie z mnożeniem macierzy powinno być $-\omega_0^2 m_{21} A_1$

Usterki redakcyjne:

1. użycie $\cos(\ldots)$zamiast przyjętego skrótu $c(\ldots)$w równaniu (4.76);
2. niejednolitość oznaczenia d_{c5}i l_{c5}w różnych częściach rozdziału;
3. brak bardziej jednoznacznego objaśnienia kolejności indeksów symboli Christoffela w równaniu (4.59). Zapis wymaga dużej uwagi, ponieważ kolejność indeksów różni się od często spotykanej konwencji. Warto byłoby wyraźnie zaznaczyć, że pierwszy indeks i jest indeksem sumowania, drugi indeks j odpowiada numerowi kolumny macierzy $\boldsymbol{C}$, a trzeci indeks k numerowi równania ruchu.
4. W rozprawie należałoby ujednolicić terminologię dotyczącą form drgań. W mianowniku liczby mnogiej poprawne są zarówno określenia „postacie drgań", jak i „postaci drgań", jednak w literaturze technicznej częściej stosuje się formę „postaci drgań". Wyjątek stanowią połączenia z liczebnikami dwie, trzy, cztery, przy których właściwa jest forma „postacie drgań" W pozostałych przypadkach wskazane jest

konsekwentne stosowanie określeń: postaci drgań własnych, wyższe postaci drgań oraz analiza postaci drgań.

5. W pracy należałoby ujednolicić terminologię dotyczącą analizy częstotliwościowej sygnałów. Określenie „widmo częstotliwościowe" jest wprawdzie rozpowszechnione w literaturze technicznej, ale częściowo redundantne. Bardziej precyzyjne byłoby stosowanie określeń „widmo sygnału przyspieszenia" lub „widmo amplitudowe przyspieszenia drgań", zależnie od wielkości przedstawionej na osi rzędnych. Należałoby również jednoznacznie określić sposób skalowania widma i jednostkę prezentowanych amplitud.

Wymienione uwagi nie podważają zasadniczych osiągnięć rozprawy ani poprawności przyjętej koncepcji badawczej. Wskazują jednak obszary do dalszej dyskusji.

i) Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalność pracy polega przede wszystkim na opracowaniu, parametryzacji i eksperymentalnej walidacji modelu matematycznego robota przemysłowego ABB IRB 1600/1.45, uwzględniającego podatność przegubów, układu mocowania czujnika siły i momentu oraz narzędzia, a także na określeniu wpływu konfiguracji robota na jego częstotliwości i postaci drgań.

Zastosowany w rozprawie opis kinematyki robota, oparty na notacji Denavita-Hartenberga, oraz sformułowanie równań dynamiki przy użyciu formalizmu Eulera-Lagrange'a wykorzystują metody dobrze ugruntowane w światowej literaturze. Również sformułowanie zagadnienia własnego w celu wyznaczenia zależnych od konfiguracji częstotliwości i postaci drgań robotów z podatnymi złączami było wcześniej przedmiotem badań. Oryginalności rozprawy należy zatem upatrywać przede wszystkim w opracowaniu, parametryzacji i eksperymentalnej walidacji modelu konkretnego robota, uwzględniającego podatność przegubów, układu mocowania czujnika siły i momentu oraz narzędzia, a nie w samych podstawach zastosowanej metodyki.

j) Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Pietruś potwierdza posiadanie przez Kandydatkę ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w szczególności w zakresie dynamiki układów mechanicznych, modelowania robotów przemysłowych, teorii drgań, analizy modalnej oraz metod pomiaru i identyfikacji właściwości dynamicznych konstrukcji. Świadczą o tym zarówno przeprowadzony przegląd piśmiennictwa, jak i prawidłowe wykorzystanie podstaw teoretycznych robotyki i mechaniki do sformułowania modelu badanego układu.

Kandydatka wykazała znajomość metod opisu kinematyki robotów, formalizmu Eulera-Lagrange'a, energetycznych podstaw wyprowadzania równań ruchu, zagadnień związanych z macierzami bezwładności i sztywności oraz zasad wyznaczania i analizy form modalnych. W rozprawie uwzględniono również analizy sygnałów drganiowych oraz eksperymentalną weryfikację modeli dynamicznych. Zastosowane narzędzia teoretyczne są właściwe dla rozpatrywanego problemu, chociaż większość z nich ma charakter klasyczny i jest dobrze ugruntowana w literaturze. Wartość pracy wynika z ich połączenia i zastosowania do

modelowania właściwości drganiowych konkretnego robota przemysłowego wraz z zamontowanym osprzętem.

O umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej świadczy sformułowanie problemu badawczego, określenie celu i zakresu rozprawy, opracowanie modelu matematycznego, wyznaczenie jego parametrów oraz przeprowadzenie obliczeń i badań eksperymentalnych. Kandydatka samodzielnie przygotowała model badanego robota, uwzględniając podatność przegubów, układu mocowania czujnika, czujnika siły i momentu oraz narzędzia. Parametry modelu określono na podstawie dokumentacji technicznej, własnego modelu CAD i pomiarów rzeczywistego obiektu.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że Kandydatka potrafi właściwie sformułować problem naukowy, dobrać odpowiednie metody jego rozwiązania, przeprowadzić badania modelowe i eksperymentalne oraz dokonać porównania i interpretacji uzyskanych rezultatów. Rozprawa potwierdza również umiejętność posługiwania się literaturą naukową, formułowania wniosków i wskazywania kierunków dalszych badań.

Podsumowanie

Rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Pietruś pt. „Badanie wpływu konfiguracji robota przemysłowego na drgania rezonansowe" dotyczy aktualnego i istotnego problemu badawczego w zakresie dynamiki robotów przemysłowych. Przedmiotem pracy jest opracowanie modelu matematycznego umożliwiającego określenie wpływu konfiguracji robota na jego częstotliwości własne oraz odpowiadające im postaci drgań, a także eksperymentalna weryfikacja uzyskanych wyników.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy należą opracowanie i parametryzacja modelu robota ABB IRB 1600/1.45, uwzględniającego podatność przegubów, układu mocowania, czujnika siły i momentu oraz narzędzia. Wartościowym elementem pracy jest połączenie modelowania matematycznego, rozwiązania zagadnienia własnego, symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych przeprowadzonych z wykorzystaniem pomiarów akcelerometrycznych i systemu wizyjnego. Pozwoliło to na ilościową ocenę zgodności częstotliwości drgań oraz jakościową i częściowo ilościową weryfikację wybranych postaci drgań.

Przeprowadzone badania potwierdziły wpływ konfiguracji robota na jego właściwości drganiowe. Opracowany model może być wykorzystany do wstępnego wyboru konfiguracji i obszarów przestrzeni roboczej ograniczających ryzyko wystąpienia rezonansu, a po dalszym rozwinięciu również do wspomagania planowania trajektorii i parametrów zrobotyzowanych procesów technologicznych.

Rozprawa zawiera również uchybienia. Najważniejsze z nich dotyczą nieprecyzyjnego opisu sposobu wyznaczania i normalizacji wektorów własnych, błędów indeksowych w części równań, niewystarczającego opisu parametrów analizy sygnałów oraz ograniczonego zakresu walidacji postaci drgań. Omówienie przyczyn części rozbieżności pomiędzy modelem a eksperymentem mogłoby być bardziej pogłębione i uzupełnione o analizę wrażliwości oraz ocenę niepewności pomiarowej. Uchybienia te mają jednak charakter lokalny i nie podważają zasadniczej koncepcji badawczej ani głównych wyników rozprawy.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, przy czym jej oryginalność ma przede wszystkim charakter aplikacyjno-metodyczny. Kandydatka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych, prowadzenia badań modelowych i eksperymentalnych, a także interpretacji uzyskanych wyników.

Konkluzja

Na podstawie przeprowadzonej oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Pietruś pt. „Badanie wpływu konfiguracji robota przemysłowego na drgania rezonansowe" prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, potwierdza jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Pietruś i dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

Jarosław Konieczny

dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. AGH