

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Kasprowiaka
pt. "Aktywne sterowanie drganiami narzędzi skrawających przy toczeniu"

1. Podstawy formalne i charakterystyka ogólna rozprawy

Podstawą opracowania recenzji jest pismo WIMIM/251/2024 z dnia 11.09.2024 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie Pana dr. hab. inż. Krzysztofa Danileckiego, prof. ZUT. Podstawę formalną opracowania recenzji stanowią zapisy następujących aktów prawnych:

- a. rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora;
- b. ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce;
- c. ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Kasprowiaka została zrealizowana w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki – pod opieką promotora dr. hab. inż. Arkadiusza Parusa, prof. ZUT i promotora pomocniczego dr. inż. Marcina Hoffmana.

Część merytoryczna pracy mieści się na 175-ciu stronach i składa się z 10-ciu rozdziałów głównych wraz z wnioskami oraz wykazu publikacji i bibliografii. Zasadnicza część rozprawy poprzedzona jest: streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem słów kluczowych również przedstawionym w języku polskim i angielskim oraz wykazem stosowanych w pracy skrótów. Autor dołączył załącznik z rozwiązaniami równań, którymi posługiwał się w realizacji rozprawy. Rozprawa zawiera również 14 tabel oraz 162 rysunki obejmujące fotografie, schematy i wykresy. Rysunki i fotografie są czytelne i łatwe do interpretacji. Wykresy czasowe i częstotliwościowe mierzonych i analizowanych wielkości mają małą rozdzielczość w stosunku do ilości prezentowanych szczegółów, a zastosowana czcionka jest zbyt mała i miejscami nieczytelna. Bibliografia obejmuje 106 pozycji literaturowych. Pozycje literaturowe od [1] do [99] znajdują swoje powołanie w tekście rozprawy, natomiast pozycje [100] do [106] są jedynie wymienione w bibliografii. Zastosowany styl numeracji tabel rysunków i pozycji bibliograficznych uwzględnia kolejność pojawiania się powołań w tekście rozprawy. W rozdziale 11 zamieszczono wykaz publikacji Autora. W wykazie tym nie przedstawiono autorów publikacji. Zestawienie zawiera 15 pozycji z czego 7 to materiały konferencyjne, a 8 to artykuły z których większość to rozdziały w monografiach opublikowane jako materiały pokonferencyjne.

2. Szczegółowa informacja o ocenianej rozprawie doktorskiej

a. Tytuł i tematyka rozprawy doktorskiej

Tematem rozprawy doktorskiej jest aktywne sterowanie drganiami narzędzi skrawających przy toczeniu, szczególnie w kontekście obrabianych detali o dużej podatności dynamicznej, lub detali obrabianych z użyciem robotów przemysłowych z otwartym łańcuchem kinematycznym. Autor rozprawy, bada problem drgań, które mogą znacząco wpływać na jakość obróbki skrawaniem oraz na efektywność produkcji. Drgania te mogą powodować szybsze zużycie narzędzi, pogorszenie dokładności obrabianych powierzchni, a w skrajnych przypadkach, nawet uniemożliwić stabilną obróbkę. Praca koncentruje się na opracowaniu systemu sterowania dla aktywnego narzędzia skrawającego, wyposażonego w układ piezoelektryczny, który pozwala na redukcję drgań.

b. Charakterystyka poszczególnych etapów pracy

Rozdziały ocenianej pracy przedstawiają szczegółowe aspekty badań aktywnych systemów redukcji drgań narzędzi skrawających. W rozdziale pierwszym Autor scharakteryzował problematykę drgań w procesie skrawania oraz zdefiniował wyzwania związane z ich tłumieniem, zwłaszcza w kontekście robotów przemysłowych. W rozdziale drugim sprecyzowano cel i tezę pracy. Wbrew tytułowi zakres nie został określony. Cel pracy jest jasno postawiony i obejmuje: *opracowanie aktywnego narzędzia skrawającego wraz z układem sterowania, możliwego do zastosowania np. na robocie przemysłowym*. Rozdział trzeci stanowi obszerny przegląd literatury podzielony tematycznie na trzy części. Autor omówił aktualny stan wiedzy związany z:

- metodami sterowania aktywnego dedykowanymi do redukcji drgań narzędzi skrawających,
- dostępnymi rozwiązaniami narzędzi skrawających,
- zastosowaniem robotów przemysłowych w obróbce skrawaniem.

Kolejny etap rozprawy stanowi rozdział związany z syntezą modeli matematycznych wykorzystywanych w dalszych etapach pracy. Omówiono model matematyczny systemu *przedmiot obrabiany–siła skrawania–narzędzie*, który stanowi podstawę do przeprowadzenia analiz numerycznych. Zastosowano model masowo-dysypacyjno-sprężysty do opisu dynamiki systemu, a także zaprezentowano równania ruchu układu jedno - i wielostopniowego, opisujące ruch drgający narzędzia i materiału obrabianego. W rozdziale tym przedstawiono koncepcję projektową CAD aktywnego noża tokarskiego oraz kinematykę prostą i odwrotną noża skrawającego wykorzystującego trzy piezo siłowniki rozmieszczone na jego obwodzie. Uwzględniono przy tym relacje geometryczne pozwalające na dokładne sterowanie położeniem narzędzia. Rozdział piąty opisuje symulacje numeryczne. Przedstawiono w nim badania numeryczne układów sterowania z algorytmem LQG i x-LMS, które pozwoliły na weryfikację efektywności redukcji drgań w zależności od użytego algorytmu. Symulacje te pozwoliły na ocenę zasobów obliczeniowych potrzebnych dla wybranych klas sterowania. Kolejny rozdział opisuje koncepcję sterowania przez kształtowanie sygnału wejściowego ISC. Autor koncentruje się na technikach sterowania poprzez kształtowanie sygnału, z uwzględnieniem projektowania postaci impulsów dla poszczególnych algorytmów ISC. Technika ISC pozwala na sterowanie bez sprzężenia zwrotnego, a co za tym idzie - bez potrzeby stosowania dodatkowych przetworników pomiarowych. Ze względu na pomiar który w warunkach obróbki skrawaniem stanowi skomplikowany problem techniczny do aktywnej redukcji drgań narzędzia zastosowano algorytm ISC. Rozdział siódmy to analiza modalna noża tokarskiego. W tym rozdziale dokonano analizy modalnej narzędzia, obejmującej identyfikację

drgań w różnych kierunkach. Analiza dostarcza informacji na temat częstotliwości własnych, tłumienia oraz form drgań. Jest to skuteczne narzędzie do projektowania i weryfikacji układu redukcji drgań. Kolejny rozdział przedstawia projekt wzmacniacza do zasilania siłowników piezoelektrycznych. Zrealizowano w nim projekt wzmacniacza zasilającego przetworniki, niezbędny do precyzyjnego sterowania narzędziem. Rozdział obejmuje opis układu oraz parametry techniczne przetworników. Bardzo ciekawy rozdział dziewiąty zawiera wyniki eksperymentów laboratoryjnych i przemysłowych, które weryfikowały efektywność zaprojektowanego narzędzia w tłumieniu drgań. Eksperymenty te potwierdziły poprawność przyjętych założeń i skuteczność w redukcji drgań. W ostatnim merytorycznym rozdziale Autor zawarł wnioski z przeprowadzonych badań oraz perspektywy dalszego rozwoju systemów aktywnego tłumienia drgań narzędzi skrawających.

Układ ocenianej rozprawy doktorskiej jest poprawny. Jedynie rozdział 8 zaburza logikę rozprawy. Projekt wzmacniacza powinien znajdować się znacznie wcześniej. Rozdziały 5 i 6 powinny być połączone i występować pod wspólnym tytułem: Synteza układu sterowania aktywnym narzędziem skrawającym.

c. Metodologia i cele badań

W ramach rozprawy założono wykonanie prototypu, opracowanie układu sterowania oraz przeprowadzenie eksperymentów w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Badania te obejmują analizę dynamiczną systemu, modelowanie matematyczne oraz testy kontrolne w rzeczywistych warunkach obróbczych, gdzie ocenie poddano skuteczność tłumienia drgań w różnych konfiguracjach narzędziowych.

Praca ta wpisuje się w rozwój nowoczesnych technologii obróbczych i odpowiada na rosnące zapotrzebowanie przemysłu na rozwiązania zwiększające precyzję i efektywność produkcji, szczególnie w kontekście robotów przemysłowych, które charakteryzują się zmniejszoną sztywnością mechaniczną. Przeprowadzone eksperymenty oraz symulacje numeryczne wykazały, że opracowane narzędzie skutecznie redukuje drgania, co pozwala na stabilniejszy i bardziej wydajny proces obróbki.

d. Ocena wyników badań i przyjętej metody badawczej

Oceniana praca szczegółowo omawia wyniki badań w zakresie tłumienia drgań aktywnego narzędzia skrawającego z uwzględnieniem analizy modalnej, symulacji numerycznych oraz eksperymentów laboratoryjnych i przemysłowych. Kluczowe aspekty oceny prezentacji wyników badań i przyjętej metody badawczej:

- Zaprezentowany przez Autora opis wyników badań jest logiczny, uporządkowany, poczynając od modelowania matematycznego, przez symulacje numeryczne, aż po testy w rzeczywistych warunkach obróbczych. Taka struktura umożliwia śledzenie ewolucji rozwiązania – od teorii do praktycznego zastosowania.
- Autor testuje różne algorytmy sterowania, takie jak LQG i x-LMS, oceniając ich skuteczność w tłumieniu drgań narzędzia i poprawie stabilności procesu skrawania. Wyniki wskazują, że algorytmy te, zwłaszcza LQG, są skuteczne w zmniejszaniu amplitudy drgań narzędzia i poprawie jakości obróbki, co potwierdzają również przeprowadzone badania numeryczne.
- Wyniki testów laboratoryjnych i przemysłowych wskazują na pozytywną korelację z wynikami symulacji. Eksperymenty z robotem przemysłowym FANUC wykazały redukcję amplitudy drgań i poprawę jakości powierzchni obrabianej. Ta zgodność wyników podnosi wiarygodność modelu oraz efektywność opracowanego narzędzia w realnych warunkach przemysłowych.

- W trakcie badań Autor zauważył pewne problemy techniczne, które negatywnie wpływały na pracę układu, jak np. problemy z mocowaniem narzędzia. Takie szczegóły są cenne, gdyż wskazują na potencjalne obszary do dalszej optymalizacji.
- W pracy omówiono zalety aktywnego tłumienia drgań z zastosowaniem siłowników piezoelektrycznych oraz prototypowym układem zasilania (wzmacniacza), które przyczyniają się do redukcji drgań na poziomie nawet do 70% w testach z regulatorem impulsowym.

Przyjęta w rozprawie przez Autora metoda badawcza wydaje się być solidnie przemyślana i wieloaspektowa, obejmując zarówno analizy teoretyczne, jak i eksperymentalne.

- Przyjęta metodologia łączy modelowanie matematyczne, symulacje komputerowe i analizy modalne z eksperymentami laboratoryjnymi i przemysłowymi. Tak szeroki wachlarz technik pozwala na wielopoziomowe zrozumienie problemu drgań oraz na skuteczne sprawdzenie założeń teoretycznych w praktyce.
- Zastosowanie analizy modalnej umożliwia precyzyjną identyfikację częstotliwości własnych i zachowań dynamicznych narzędzia. Dzięki temu możliwe jest dokładne zbadanie wpływu drgań na narzędzie skrawające i skonstruowanie modelu dynamicznego, co jest kluczowe dla skutecznego sterowania drganiami.
- Wykorzystanie robota przemysłowego Fanuc M800iA/60 w badaniach - walidacja w warunkach przemysłowych - zwiększa wiarygodność wyników, ponieważ metoda badawcza uwzględnia rzeczywiste środowisko przemysłowe. Weryfikacja praktyczna jest ważna, gdyż odzwierciedla realistyczne warunki pracy, gdzie czynniki zewnętrzne i zmienność parametrów obiektu mogą wpływać na wyniki.

Potencjalne ograniczenia

- Symulacje opierają się na liniowych modelach matematycznych, które mogą nie uwzględniać nieliniowych zachowań układów piezoelektrycznych (jak np. histereza). Wszystkie użyte w pracy modele są liniowe i stacjonarne. Może to wpływać na dokładność przewidywań modeli w porównaniu z rzeczywistymi wynikami eksperymentalnymi, co wykazano w rozbieżnościach między symulacjami a eksperymentami.
- Laboratorium, w którym realizowano prace badawcze jest wyposażone w zaawansowane systemy pomiarowe, takie jak Polytec PSV-500-3, LMS Scadas III, dSpace 1006, które mogą być trudne do wdrożenia w przeciętnym zakładzie przemysłowym. Może to ograniczać potencjalne zastosowanie metody w rzeczywistym środowisku produkcyjnym.

Prezentacja i analiza wyników badań jest przekonująca, dobrze udokumentowana i odzwierciedla wysoki poziom merytoryczny. Wyniki testów laboratoryjnych i przemysłowych dostarczają silnych dowodów na efektywność opracowanego narzędzia oraz możliwości wdrożeniowe w przemyśle obróbki skrawaniem, co podkreśla praktyczne znaczenie prowadzonych badań. Metoda badawcza przyjęta w rozprawie prowadzi do osiągnięcia postawionego celu. Zastosowane techniki wykazują dużą skuteczność przyjętych metod analizy i syntezy układów redukcji drgań narzędzi skrawających, szczególnie w kontekście zastosowań przemysłowych. Oparcie metodologii na kompleksowej analizie modalnej, sterowaniu optymalnym i testach w realistycznych warunkach sprawia, że praca ma duży potencjał wdrożeniowy. Pomimo pewnych ograniczeń związanych z modelowaniem liniowym i zaawansowanym wyposażeniem badawczym, przyjęta metoda stanowi dobrze przemyślane i solidne podejście do rozwiązywania problemu drgań w procesie skrawania.

e. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Kasprowiaka dotyczy aktywnego tłumienia drgań narzędzi skrawających i stanowi oryginalne podejście do problemu drgań występujących w obróbce skrawaniem, szczególnie w kontekście stosowania elastycznych struktur, takich jak roboty przemysłowe o otwartym łańcuchu kinematycznym.

Autor zaprojektował aktywne narzędzie skrawające wyposażone w układ piezoelektryczny, które wykazuje zdolność do aktywnego tłumienia drgań. Narzędzie to wyróżnia się uniwersalnością, umożliwiającą zastosowanie w różnych konfiguracjach obróbczych, co jest innowacyjnym rozwiązaniem w przemyśle obróbki skrawaniem. Praca łączy wiedzę z obszarów mechatroniki, mechaniki, teorii sterowania, technologii materiałów inteligentnych oraz robotyki przemysłowej, wprowadzając do badań aktywne techniki tłumienia drgań w sposób, który uwzględnia specyficzne wymagania dynamiczne robotów przemysłowych. Zastosowanie różnych algorytmów sterowania - takich jak - LQG, x-LMS czy ISC, umożliwi skuteczną redukcję amplitudy drgań w warunkach zmiennego obciążenia i różnych wymuszeń. Wybór algorytmu zależy od postawionych wymagań dotyczących jakości obróbki oraz uwarunkowań technologicznych związanych z aplikacją układu pomiarowego i sterującego. Aplikacja znanych z literatury algorytmów sterowania drganiami uwzględnia ograniczenia sprzętowe oraz możliwości fizycznej realizacji. Przeprowadzenie badań zarówno w laboratorium, jak i w rzeczywistych warunkach przemysłowych (z użyciem robota przemysłowego Fanuc M800iA/60) stanowi istotne osiągnięcie, gdyż dowodzi praktycznej przydatności opracowanego rozwiązania i potwierdza jego potencjał wdrożeniowy. Autor pracy dowodzi, że dostępne na rynku rozwiązania nie spełniają w pełni potrzeb związanych z tłumieniem drgań w elastycznych układach kinematycznych, takich jak roboty przemysłowe. Praca odpowiada więc na faktyczny brak rozwiązań w tej dziedzinie, co podkreśla jej nowatorski charakter.

Pracę doktorską można uznać za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z uwagi na nowatorskie połączenie technologii piezoelektrycznej z aktywnym sterowaniem drganiami oraz dostosowanie tego rozwiązania do specyficznych wymagań dynamicznych robotów przemysłowych. Wprowadzone podejście i uzyskane rezultaty mają potencjał do znaczącego wpływu na zwiększenie precyzji i efektywności produkcji, co jest niezwykle istotne dla rozwijającego się przemysłu obróbki skrawaniem.

f. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Kasprowiaka wskazuje zarówno na szeroką wiedzę teoretyczną kandydata w zakresie inżynierii mechanicznej, jak i na jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Kandydat wykazuje głęboką znajomość problemu drgań w kontekście obróbki skrawaniem. Zrozumienie dynamicznych interakcji między narzędziem, materiałem obrabianym oraz maszyną sugeruje szeroką wiedzę w zakresie mechaniki drgań i dynamiki maszyn, która jest kluczowa w dyscyplinie, którą ma reprezentować Autor rozprawy. Praca pokazuje, że kandydat jest dobrze zorientowany w nowoczesnych metodach aktywnego tłumienia drgań oraz w technologiach, takich jak piezoelektryki i inteligentne materiały, które są stosowane w tej dziedzinie. Wybór piezoelektrycznych siłowników opartych na inteligentnych systemach świadczy o jego dobrej znajomości nowoczesnych technologii inżynierskich. Kandydat przeprowadził obszerny przegląd literatury dotyczącej istniejących metod tłumienia drgań, algorytmów sterowania oraz technologii wibracyjnych. Przedstawienie algorytmów x-LMS i LQG, wraz z ich zastosowaniami wskazuje na jego

znajomość zaawansowanych technik sterowania, co dowodzi umiejętności integrowania teorii sterowania z rzeczywistymi potrzebami w inżynierii mechanicznej.

Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Kandydat samodzielnie opracował prototyp narzędzia skrawającego z układem piezoelektrycznym, który przechodził testy w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Samodzielne wykonanie takiego projektu, obejmujące wszystkie fazy – od modelowania matematycznego po testy w rzeczywistych warunkach – świadczy o jego umiejętności prowadzenia kompleksowego projektu badawczego. Przeprowadzenie analizy modalnej, implementacja symulacji numerycznych oraz testy na robocie przemysłowym świadczą o jego umiejętnościach praktycznych i dojrzałości badawczej. Ponadto, kandydat zademonstrował zdolność do adaptacji i optymalizacji metod badawczych, co podkreśla jego wszechstronność i dojrzałość w pracy badawczej. Samodzielne opracowanie algorytmów sterowania i jego dostosowanie do wymagań obróbki skrawaniem świadczy o wysokiej kompetencji w zakresie samodzielnego prowadzenia badań i tworzenia rozwiązań technicznych, które mają bezpośrednie zastosowanie praktyczne. Kandydat wykazał się umiejętnością krytycznej analizy wyników, identyfikując zarówno osiągnięcia, jak i wyzwania techniczne, które pojawiły się podczas badań. Umiejętność identyfikacji ograniczeń opracowanego rozwiązania oraz sugestie dotyczące jego przyszłego rozwoju pokazują dojrzałość naukową i zdolność do samodzielnego wnioskowania.

Rozprawa doktorska wskazuje na szeroką wiedzę teoretyczną mgr. inż. Mateusza Kasprowiaka w zakresie mechaniki, drgań, materiałoznawstwa i technik sterowania, a także na jego wysoką samodzielność i zdolność do prowadzenia zaawansowanej pracy badawczej. Kompetencje te potwierdzają jego przygotowanie do kontynuowania samodzielnego prowadzenia badań naukowych w dziedzinie inżynierii mechanicznej.

g. Piśmiennictwo i literatura wykorzystana w ramach rozprawy doktorskiej.

Literatura wykorzystana przez Autora do powstania rozprawy jest prawidłowa. W większości powołane prace to nowe rozwiązania opisane w renomowanych czasopismach naukowych. Jedyne dwie pozycje nieautorskie stanowią nieaktualne linki do stron producentów robotów przemysłowych. Cytowane artykuły dotyczą zagadnień związanych z systematyką rozprawy doktorskiej. Literatura cytowana jest w sposób prawidłowy i jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy, a dobór poszczególnych pozycji jest uzasadniony merytorycznie. Autor bardzo precyzyjnie podchodzi do przedstawienia aktualnego stanu wiedzy w aspekcie układów sterowania. W przeglądzie literatury powinny znaleźć się również pozycje zawierające bardziej zaawansowane algorytmy sterowania, nawet jeżeli Autor nie rozważa ich zastosowania.

3. Analiza krytyczna rozprawy doktorskiej

Pozytywne aspekty pracy

Praca koncentruje się na nowatorskim zastosowaniu technologii piezoelektrycznych i aktywnego tłumienia drgań w kontekście narzędzi skrawających, co stanowi odpowiedź na aktualne potrzeby przemysłowe. Problem drgań w obróbce skrawaniem ma znaczący wpływ na jakość i efektywność procesów produkcyjnych, zwłaszcza w przypadku użycia robotów przemysłowych o ograniczonej sztywności. Podjęcie tego tematu jest zatem uzasadnione zarówno naukowo, jak i praktycznie. Rozprawa prezentuje wszechstronne podejście do problemu, łącząc modelowanie matematyczne, symulacje numeryczne, analizę modalną oraz eksperymenty zarówno laboratoryjne, jak i przemysłowe. Takie zróżnicowanie metod

badawczych zwiększa wiarygodność wyników i umożliwia ich praktyczne zastosowanie, co jest istotnym atutem rozprawy. Autor zastosował zaawansowane algorytmy sterowania takie, jak x-LMS oraz LQG, które są dopasowane do specyficznych wymagań dynamicznych w procesach obróbki skrawaniem. Dodatkowo, wybór i opis narzędzi badawczych, jak analiza modalna czy testy na robocie Fanuc, wskazuje na kompetencje techniczne kandydata oraz zdolność do wykorzystania nowoczesnych technologii w realizacji badań. Wyniki badań, które wskazują na skuteczną redukcję drgań i poprawę jakości obrabianej powierzchni w procesie skrawania, potwierdzają efektywność zaprojektowanego narzędzia. Dzięki temu rozprawa może stanowić wartościowy wkład w rozwój technologii aktywnego tłumienia drgań, szczególnie w zastosowaniach przemysłowych.

Obszary wymagające poprawy lub dalszego rozwinięcia

W pracy zastosowano modelowanie matematyczne do opisanie układu dynamicznego „narzędzie – siła skrawania – przedmiot obrabiany”, mogłoby się przydać głębsze uzasadnienie teoretyczne dla wyboru konkretnych modeli (np. liniowych modeli piezoelektryków). Rozbudowane wyjaśnienia mogłyby zwiększyć przejrzystość i spójność metodologiczną.

W pracy brak jest dogłębnego porównania wyników z danymi z literatury międzynarodowej. Analiza porównawcza mogłaby podkreślić innowacyjność i unikalność zastosowanych rozwiązań, a także lepiej umieścić wyniki pracy w kontekście aktualnych badań w tym obszarze.

Pomimo, że praca koncentruje się na problemach istotnych dla przemysłu, mogłaby bardziej szczegółowo przedstawiać potencjalne zastosowania wyników oraz wnioski praktyczne dotyczące wdrożeń. Przykładowo, omówienie kroków wdrażania takich rozwiązań w różnych sektorach przemysłu obróbczo-maszynowego mogłoby zwiększyć potencjał aplikacyjny badań.

W pracy brakuje szczegółowych sugestii co do przyszłych kierunków badań. Biorąc pod uwagę, że drgania są problemem złożonym i mogą być zależne od wielu czynników takich, jak warunki obróbki czy typ materiału, dodatkowe zalecenia mogłyby wskazać potencjalne rozszerzenia badań (np. badania nad tłumieniem drgań w narzędziach o innych kształtach i materiałach).

Opis algorytmów oraz obliczeń jest technicznie poprawny, jednak prezentacja wyników matematycznych mogłaby być bardziej przystępna, szczególnie w częściach poświęconych równaniom i ich implementacji w modelowaniu numerycznym. Przykłady praktycznych interpretacji mogłyby ułatwić czytelnikom lepsze zrozumienie zastosowanych metod.

4. Uwagi do pracy, zagadnienia do dyskusji i pytania do wyjaśnienia

Uwagi ogólne

1. Mało precyzyjny język – w pracy wielokrotnie pojawia się nieprecyzyjne lub potoczne słownictwo, co nie przystaje do charakteru tekstu naukowego.
2. Liczne literówki i błędy pisarskie – praca zawiera liczne drobne błędy językowe, które mogą negatywnie wpływać na odbiór treści.
3. Niefortunne określenia nieprzystające do pracy technicznej – zastosowano wyrażenia, które nie oddają w pełni specyficznej terminologii inżynierskiej, jak np. „duża wysokość”, „niska sztywność”, „łatwość regulacji parametrów”.
4. Brak precyzyjnych definicji terminów technicznych – w pracy wielokrotnie pojawiają się określenia techniczne takie, jak „granica stabilności”, „stabilność narzędzia”, „współczynnik siły siłownika”, „aktywne nadzorowanie drgań” bez ich wyjaśnienia.

5. Niekonsekwencja w jednostkach – stosowanie miar powinno być zgodne z systemem SI, a przyjęte współczynniki i jednostki powinny być jednolite w całej pracy.
6. Brak spójności w wynikach – w pracy można wskazać obszary, w których wstawienie wartości do równań nie prowadzi do zgodnych wyników lub gdzie pojawiają się niespójności między opisem a rysunkami i tabelami.

Uwagi i pytania szczegółowe

1. Strona 14 – nie zdefiniowano pojęcia „czas odpowiedzi” – określenie nie jest szczegółowo wyjaśnione.
2. Niektóre fragmenty zdań sprawiają wrażenie tłumaczeń maszynowych, np. na stronie 15: „nakład kontrolny”, „zakłócenie procesowe” oraz na stronie 20: „proces modelowania ramienia, zamodelowanego jako model ciągły belki...”.
3. Nieprecyzyjne pojęcie „jakość sterowania” – Autor używa tego terminu w sposób niejednoznaczny, bez podania wyjaśnienia, co konkretnie obejmuje „jakość sterowania”. Pojęcie to może obejmować szereg zagadnień – takich, jak np.: efektywność redukcji drgań, zapotrzebowanie na energię zewnętrzną, siła docisku narzędzia skrywającego itp.
4. W pracy często efektywność redukcji drgań wyrażona jest w procentach. W literaturze światowej jest to rzadko stosowane. Najczęściej współczynnik redukcji drgań odnoszony jest do wartości amplitudy wymuszenia i podawany jest w decybelach. Współczynnik przenoszenia drgań zawsze obliczany jest dla konkretnej częstotliwości, a stosowanie ogólnego wskaźnika redukcji drgań powinno być powiązane z podaniem jego definicji.
5. Co Autor rozumie przez pojęcie „współczynnik siły siłownika”?
6. Co Autor rozumie przez pojęcie „aktywne nadzorowanie drgań”?
7. Brak szczegółowego wyjaśnienia pojęć „granica stabilności” i „stabilność narzędzia”. Terminy te występują np. na stronach 22, 25 i 26, jednak brak dokładnych definicji sprawia, że ich interpretacja może być niejednoznaczna.

Np. str. 22:

Następnie przeprowadzono optymalizację układu bocznika jednomodowego wykorzystując do tego celu algorytm genetyczny, co spowodowało zwiększenie granicy stabilności narzędzia o 165% dla użytego modelu belki Eulera Bernoulliego. Ponadto opracowano MES dla tej samej geometrii w celu porównania, dzięki czemu zaobserwowano wzrost granicy stabilności wynosi 336%.

Np. str. 25:

okres i amplitudę przyłożonego napięcia. Wpływ odległości montażu elementów piezoelektrycznych na obszary stabilności drgań oraz wykres stabilności narzędzia dla wartości $n_1 = 0$ oraz $n_2 = 0,5$ przy różnych wartościach przyłożonego napięcia przedstawiono na rysunku 13. Wyniki wskazują, że zastosowanie stosów

lub 26:

piezoelektrycznych znacząco podnosi równoważną sztywność układu. W rezultacie skuteczność zastosowania piezoelektryków w zakresie stabilności, a także głębokość skrawania bez występowania zjawiska drgań, gwałtownie rosną.

8. Rysunki 51 i 52 przedstawiają te same parametry, ale z różnymi oznaczeniami (d i c), co może być mylące.
9. Na stronie 59 składniki równań opisane w objaśnieniach pod rysunkiem 52 po podstawieniu do równania (3) nie prowadzą do równania przedstawionego wzorem (4). Ponadto model siły tłumienia wiskotycznego jest znacząco różny od modelu siły tarcia, zatem nie można ich interpretować jako tej samej siły.
10. Niekonsekwencja w wymiarach i jednostkach – wymiar współczynnika sztywności i współczynnika tłumienia wiskotycznego powinien być zgodny z międzynarodowym układem jednostek miar SI.
11. Na stronie 96, w pierwszym akapicie Autor pisze „*Podawanie impulsów wejściowych w przeciw-fazie do występujących oscylacji musi wystąpić w odpowiedniej sekwencji, muszą być podane z ściśle określoną amplitudę oraz w ściśle określonym czasie.*” Proszę o wyjaśnienie: w jaki sposób jest wykrywana faza sygnału – skoro sygnał sterujący ma być generowany w przeciw-fazie oraz na jakiej podstawie jest określany czas wystawiania impulsów, skoro układ nie zawiera sprzężenia zwrotnego.
12. Niejasne wyrażenie na stronie 97 – „W celu ... należy dokonać splotu filtru z dowolnym sygnałem” wymaga precyzyjniejszego sformułowania, np. „W celu ... należy dokonać splotu równania opisującego filtr (lub modelu) z dowolnym sygnałem”.
13. Brak oznaczenia w równaniu (68) – Po lewej stronie równania (68) brakuje symbolu v . Powinno być $v(t)$.
14. Strona 98, drugi akapit

dobrane. Filtr projektowany jest w dziedzinie czasu [instrukcja], a efekt działania algorytm ZV to przebieg czasowy w postaci impulsów o amplitudzie A_i oraz czasie

15. Proszę przedstawić obliczenia dla współczynników $\zeta, \omega_n, \omega_d, \delta$ ze strony 103.
16. Tabela 8 ze strony 118 zawiera błędne odwołania.
17. Do wyznaczenia charakterystyk w rozdziale 7.2 wykonano eksperyment z użyciem młotka modalnego Kistler 9726A20000. Proszę o oszacowanie wartości siły i przyspieszenia dla częstotliwości ok. 1500 [Hz].
18. Na stronach 122 i 124 Autor informuje, że przeliczenie z przyspieszenia na przemieszczenie dokonano poprzez podwójne całkowanie funkcji przejścia, jednak brakuje wyjaśnienia metody i dziedziny całkowania.
19. Brak źródła odwołania – Na stronie 126 pojawia się komunikat „Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania” w drugim akapicie.
20. Podpis pod rysunkiem 133 sugeruje, że na rysunku zaprezentowano widmo prędkości. Proszę o komentarz do jednostki użytej na osi rzędnych. Proszę o informację, jaka jest rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości dla przedstawionej charakterystyki.
21. Co Autor rozumie przez pojęcie „tor identyfikacji”?
22. Proszę o informację, jak dobrano wagi macierzy Q i R dla regulatora LQR?

5. Podsumowanie i konkluzja

Rozprawa jest dobrze przemyślanym i starannie wykonanym opracowaniem, które podejmuje ważne zagadnienie i stosuje zaawansowane techniki do jego rozwiązania. Wykazuje oryginalność, zarówno w zakresie proponowanego rozwiązania, jak i zastosowanej metodologii. Mimo to, pewne aspekty mogłyby zostać rozbudowane lub lepiej uzasadnione, zwłaszcza jeśli chodzi o teoretyczne podstawy modeli i odniesienia do badań międzynarodowych. Rozwinięcie sugestii praktycznych i przyszłych kierunków badań mogłoby również zwiększyć znaczenie rozprawy dla przemysłu i nauki. Autor zastosował kompleksową metodologię badawczą, obejmującą zarówno teoretyczne modelowanie, jak i walidację eksperymentalną, co podkreśla rzetelność podejścia. Użycie analizy modalnej wskazuje na wysoką świadomość metodologii w zakresie dynamicznych badań materiałów i struktur mechanicznych. Oceniana rozprawa stanowi wartościowy wkład w rozwiązanie problemu tłumienia drgań w obróbce skrawaniem oraz wskazuje na dużą wiedzę i kompetencje Autora w dziedzinie inżynierii mechanicznej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi zdaniem recenzenta oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego. Kandydat samodzielnie rozwiązał zagadnienie badawcze z zakresu dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna oraz wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej. Wyniki badań dowodzą słuszności tezy sformułowanej przez Doktoranta oraz jego dobrego przygotowania do prowadzenia badań naukowych i realizacji prac badawczych. Uwagi sformułowane w punktach 3 i 4 recenzji mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony. Przedstawiona do recenzji praca spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. – o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06 2016 r., poz. 882), w związku z tym **wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej pt. "Aktywne sterowanie drganiami narzędzi skrawających przy toczeniu" autorstwa mgr. inż. Mateusza Kasprowiaka oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.**

Janusz Konieczny