

dr hab. inż. Mariusz Giergiel
Akademia Górniczo - Hutnicza
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków



Kraków, 23-12-2014.

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Weremczuka

pt. „**Analiza drgań nieliniowych układów mechanicznych z opóźnieniem czasowym**”

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Jerzy Warmiński

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Rafał Rusinek

1. Wybór tematu, cel i zakres pracy

W pracy zajmowano się badaniami drgań układów mechanicznych, w których występuje człon opóźnienia czasowego. Główny nacisk został położony na analizę wpływu opóźnień czasowych na stabilność układów mechanicznych oraz możliwość wykorzystania tego zjawiska do sterowania drganiami oraz redukcji drgań. Przedstawiono analizę teoretyczną dynamiki pojedynczych lub sprzężonych oscylatorów Duffinga z opóźnieniem czasowym. Następnie zbadano wybrane modele procesów skrawania, w których występują drgania typu „chatter”. Uzyskane wyniki wykorzystano do opracowania metody aktywnej eliminacji drgań, którą wstępnie zweryfikowano na stanowisku badawczym.

Pomimo istniejących badań w tym zakresie uważam, że są to wysoce aktualne problemy, a podjęcie tej tematyki przez doktoranta jest uzasadnione i na czasie.

Recenzowana praca doktorska obejmuje 120 stron tekstu wraz z zawartymi w nim 91 rysunkami, zdjęciami, schematami, 4 tabelami, bibliografią liczącą 128 pozycji, wykazem ważniejszych oznaczeń oraz 4 załącznikami. Na zasadniczą część pracy składają się: wstęp, przegląd literatury, uzasadnienie podjętego tematu i tezy pracy, 5 rozdziałów części

zasadniczej oraz podsumowanie i wnioski końcowe. W **rozdziale pierwszym** Autor zarysował kontekst badanej problematyki, krótko omówił zasadność wykorzystania układów z opóźnieniem czasowym oraz przedstawił zarys rozprawy doktorskiej. **Rozdział drugi** rozprawy zawiera obszerny przegląd literatury dotyczącej dynamiki układów nieliniowych ze szczególnym uwzględnieniem układów z opóźnieniem czasowym. Zasygnalizowano różnice w modelowaniu układów z wykorzystaniem modeli liniowych i nieliniowych. Krótko scharakteryzowano problemy występujące w analizie nieliniowych równań różniczkowych. W dalszej części omówiono literaturę dotyczącą odrębnej klasy układów opisanych równaniami różniczkowymi, w którym występuje przesunięty argument. Do tej grupy można zaliczyć zmodyfikowane równanie Duffinga, które może być wykorzystane do modelowania procesów obróbki skrawaniem. Szczególną rolę w obróbce skrawaniem odgrywają drgania samowzbudne typu „chatter”, na które zwrócono szczególną uwagę podczas przeglądu literatury. Główny nacisk przeglądu literatury położono na proces frezowania, którego dynamika jest bardziej złożona niż dynamika procesu toczenia. W przeglądzie literatury można również znaleźć pozycje dotyczące problematyki eliminacji niekorzystnych drgań występujących podczas obróbki skrawaniem. W **rozdziale trzecim** w uzasadnieniu podjętego tematu Autor zwraca uwagę, że w literaturze dotyczącej dynamiki układów nieliniowych niewiele jest prac analizujących wpływ opóźnienia czasowego na dynamikę. Ponadto problem jest jeszcze mniej zbadany w przypadku większej liczby stopni swobody. Stało się to bezpośrednią przyczyną podjęcia przez Doktoranta powyższej tematyki. W części tej Autor zaprezentował również tezy rozprawy doktorskiej. W **rozdziale czwartym** przeprowadzona została analiza drgań układu o jednym stopniu swobody z opóźnieniem czasowym. Korzystając z metody bilansu harmonicznego uzyskano rozwiązanie modelu liniowego. Następnie stosując metodę wielu skal czasowych rozwiązano analitycznie nieliniowy model Duffinga. Na podstawie wyznaczonych rozwiązań analitycznych zbadano stabilność i wpływ parametrów na dynamikę układu. Dokonano również weryfikacji numerycznej uzyskanych rozwiązań analitycznych. **Rozdział piąty** w całości poświęcono obróbce skrawaniem. Jest to przykład procesu technologicznego, w którym opóźnienie czasowe jest jednym z głównych mechanizmów generujących drgania typu „chatter”. W rozdziale tym przeprowadzono analizę najprostszego modelu skrawania ortogonalnego. Dodatkowo na podstawie obliczeń analitycznych i numerycznych wyznaczono wykresy stabilności oraz dokonano analizy wpływu podstawowych parametrów na zachowanie i stabilność procesu. W **szóstym rozdziale** przeprowadzono analizę podstawowych zjawisk dynamicznych towarzyszących frezowaniu, które jest bardziej złożonym procesem niż skrawanie ortogonalne. Przedstawiono

jednowymiarowy model frezowania, na podstawie którego przeprowadzono analizę wpływu parametrów na dynamikę procesu. W efekcie otrzymano wykresy stabilności dla różnej liczby ostrzy narzędzia oraz wyznaczono wpływ szerokości skrawania na przebieg siły skrawania i drgania układu w różnych obszarach stabilności. **Rozdział siódmy** zawiera przedstawienie uzyskanych wyników badań analitycznych i numerycznych sprzężonych oscylatorów Duffinga, opisanych równaniami różniczkowymi z opóźnieniem czasowym. Rozwiązanie analityczne modelu w otoczeniu rezonansów podstawowych uzyskano za pomocą metody wielu skal czasowych. Dokonano analizy wpływu podstawowych parametrów na dynamikę układu. Wyniki badań analitycznych zweryfikowano numerycznie. Kolejny, **ósmym rozdziałem** poświęcono nieliniowemu modelowi frezowania o dwóch stopniach swobody, w którym uwzględniono możliwość aktywnej redukcji drgań. Zaproponowany model uwzględnia aktywne zamocowanie przedmiotu obrabianego. Posługując się parametrami rzeczywistego układu, otrzymanymi z analizy modalnej, wykonano badania numeryczne wykorzystując sterowanie w torze otwartym i zamkniętym. Przedstawiono stanowisko doświadczalne oraz wyniki badań laboratoryjnych z wykorzystaniem układu aktywnej eliminacji drgań. Dokonano analizy wyników numerycznych oraz eksperymentalnych oceniając możliwość sterowania drganiami. Na podstawie uzyskanych wyników omówiono strategię działań na przyszłość. W ostatnim **dziewiątym rozdziale** Autor przedstawił podsumowanie rozprawy doktorskiej oraz wnioski końcowe w świetle przeprowadzonych badań.

Niestety nie sprecyzowano w sposób jasny **celu pracy**, chociaż pośrednio można go odnaleźć w rozdziale trzecim zawierającym uzasadnienie podjętego tematu. Zostały natomiast postawione **dwie tezy naukowe** opisane jako:

„1. Wprowadzenie do nieliniowego układu mechanicznego sygnału okresowego z opóźnieniem czasowym umożliwia zmianę dynamiki układu z regularnej w chaotyczną lub chaotycznej w regularną”

„2. Możliwy jest dobór zewnętrznego wymuszenia przy którym występuje istotna redukcja drgań typu „chatter” generowanych w procesie frezowania poprzez efekt regeneracyjny.”

Warto zaznaczyć potencjał aplikacyjny wynikający z uzyskanych efektów rozprawy, szczególnie jeżeli chodzi o zaproponowany system aktywnej redukcji drgań obrabiarek, który jest użyteczny zarówno na etapie projektowania nowych konstrukcji jak i udoskonalania i modernizacji już istniejących i obecnie eksploatowanych.

Nowatorstwa i oryginalności pracy można upatrywać w dokonanej analizie wpływu opóźnień czasowych na stabilność układów mechanicznych oraz możliwość wykorzystania tego zjawiska do sterowania drganiami oraz redukcji drgań, a także przedstawionych w pracy badaniach analitycznych oraz symulacyjnych wraz z ich weryfikacją doświadczalną, co może w istotny sposób zmienić spojrzenie na proces projektowania nowoczesnych obrabiarek.

2. Poprawność metodyki badań i analiza wyników

W pracy przeprowadzono zarówno badania analityczne, symulacyjne jak i doświadczalne. Udowodniono słuszność zaproponowanego podejścia oraz co ważne jego praktyczną użyteczność. Zastosowana metodyka badań jest prawidłowa, analiza wyników badań przeprowadzona w sposób właściwy świadcząc o dużym zasobie wiedzy, inwencji, pracowitości i rzetelności naukowej autora.

Należy szczególnie podkreślić widoczny duży nakład pracy autora przy wykonywaniu rozprawy i dobre ujęcie problematyki zawierającej badania teoretyczne, symulacyjne oraz badania doświadczalne. Takie kompleksowe rozwiązanie jest niewątpliwie dużym osiągnięciem i zasługuje na uznanie.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi jakie nasuwają się po lekturze pracy są dwojakiego rodzaju. Po pierwsze są to **uwagi ogólne i redakcyjne**. Zauważyć należy, że rozprawa jest bardzo starannie przygotowana zawiera jednak nieco różnorodnych usterek redakcyjnych, edytorskich, których wymienienie w tym miejscu nie wydaje się celowe. Niekiedy jednak mogą one utrudniać nieco lekturę lub prowadzić do wątpliwości, jak na przykład brak jednostek w opisach osi wielu zaprezentowanych w pracy wykresów, tym bardziej że często te same oznaczenia są używane do wielkości wymiarowych i bezwymiarowych. Zarówno te wymienione jak i inne redakcyjne usterki nie umniejszają jednak merytorycznej wartości pracy.

W sensie merytorycznym natomiast pojawiają się raczej **uwagi dyskusyjne** niż krytyczne:

1. W analizach symulacyjnych pokazanych w rozdziale 8.4 do całkowania numerycznego zastosowano metodę Rungego-Kutty czwartego rzędu. Brak jest wyjaśnień dlaczego zastosowano akurat tę metodę. Jest to o tyle istotne, że niekiedy zastosowany algorytm całkowania numerycznego może mieć istotny wpływ na dokładność uzyskiwanych rozwiązań.
2. Zaproponowana koncepcja układu aktywnej eliminacji drgań w procesie skrawania zakłada zastosowanie regulatora proporcjonalno - różniczkującego PD. Nie wyjaśniono jednak dlaczego zdecydowano się właśnie na taki regulator.
3. W jaki sposób dobierano parametry regulatora i czy można uznać, że dobrano parametry w najlepszy możliwy sposób.
4. Dlaczego pomimo zresztą padającego w pracy stwierdzenia, że dla układu aktywnej eliminacji drgań ze sterowaniem w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego dobór parametrów jest utrudniony, a uzyskane efekty nie są zadowalające to tylko dla takiego przypadku przeprowadzono badania doświadczalne.

4. Podsumowanie

Omawiana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań i świadczy ona o tym, że Autor umie postawić zagadnienie i rozwiązać je na drodze teoretycznej oraz zweryfikować doświadczalnie, a wyniki badań zanalizować i wyciągnąć poprawne wnioski. Jego wywody są jasne a wyniki rozprawy mogą być użyteczne z naukowego jak i technicznego punktu widzenia.

Biorąc pod uwagę całość pracy należy stwierdzić, że autor rozwiązał istotny problem nowoczesnej tematyki naukowej w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie mechanika.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Weremczuka spełnia warunki określone w aktualnie obowiązującej ustawie w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony.

