POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 26.05.2022
nr 6 zał. .....

Prof. Dr hab. inż. Ewaryst Rafajłowicz

Członek korespondent PAN

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Politechnika Wrocławska

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Jarosława Rzepeckiego

"Application of smart materials for selected vibration reduction problems"

„Zastosowanie materiałów inteligentnych w wybranych problemach redukcji drgań"

Niniejsza recenzja została napisana na zlecenie Politechniki Śląskiej w związku z z toczącym się przewodem doktorskim Pan mgr inż. J. Rzepeckiego.

Tematyka rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy metod redukcji drgań z użyciem materiałów inteligentnych. W tytule rozprawy Autor używa słów „Zastosowanie materiałów inteligentnych ...". Jest to – moim zdaniem – nadmiernie skromne sformułowanie, gdyż rozprawa zawiera także propozycje nowych materiałów, które zostały opracowane i zbadane zgodnie z regułami automatyki. Ponadto, cała rozprawa bazuje i rozwija teorię i zastosowania automatyki oraz związanych z nią technik pomiarowych.

We Wstępie do rozprawy mgr J. Rzepecki bardzo trafnie przedstawia praktyczne powody podjęcia tematyki tłumienia drgań w urządzeniach codziennego użytku. W skrócie, jest to redukcja zanieczyszczenia środowiska akustycznego i wibracji przenoszonych na ciało człowieka. Oba te czynniki mają znaczący wpływ na nasze zdrowie.

Tematyka redukcji drgań znajduje się w obszarze zainteresowań wielu ośrodków naukowych od wielu lat. W szczególności, jak podkreśla Doktorant, miał On możliwość realizacji swoich badań w Katedrze Pomiarów i Systemów Sterowania Politechniki Śląskiej, kierowanej przez Prof. Marka Pawełczyka. Zespół ten prowadzi badania redukcji drgań od ponad 25 lat. Nowym nurtem w tym doktoracie jest zaproponowanie i zbadanie własności materiałów inteligentnych pod kątem skuteczności redukcji drgań w urządzeniach różnych rodzajów.

Trafność tego wyboru uzasadnię w dalszej części recenzji.

Doktorant sformułował tezę rozprawy (w swobodnym przekładzie) następująco:
Istotna redukcja drgań struktur mechanicznych możliwa jest dzięki wykorzystaniu materiałów inteligentnych, opartych na zjawiskach indukcji elektrycznej lub elektromagnetycznej i odpowiednim ich sterowaniu, tak by zapewnić zwiększenie sztywności struktur w wybranych obszarach.
Teza rozprawy sformułowana została w sposób jasny i weryfikowalny.

Tematykę rozprawy uważam za aktualną i ważną dla metod regulacji automatycznej, ukierunkowanych na redukcję drgań metodami półaktywnymi.

1. Zawartość i kompozycja rozprawy

Rozprawa składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, Wstępu, 4 rozdziałów przedstawiających wyniki badań i rozdziału podsumowującego. Oprócz obszernej bibliografii rozprawa zawiera także użyteczne materiały pomocnicze, w tym spis akronimów, tabel, rysunków etc.

Przedstawiając w skrócie zawartość poszczególnych rozdziałów będę jednocześnie zwracał uwagę na osiągnięcia mgr J. Rzepeckiego.

Rozdział wstępny zawiera wprowadzenie do problematyki redukcji drgań oraz przegląd metod i narzędzi, które są aktualnie stosowane. Nacisk położony jest na te aspekty, które dalej będą w rozprawie badane, w tym zwłaszcza na inteligentne materiały oraz na metody półaktywne redukcji drgań.

W Rozdziale 2 Autor opisuje aparaturę, która była używana do badań. Uwagę zwraca fachowość opisów urządzeń pomiarowych, sterujących i wymuszających o bardzo różnej naturze fizycznej, co dobrze świadczy o szerokiej wiedzy mgr J. Rzepeckiego. Co ważniejsze, w rozdziale tym znajdujemy również opis przyrządów laboratoryjnych, których koncepcje są autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Szczególną uwagę zwraca propozycja kamery akustycznej opisana i zbadana w tym rozdziale. Doktorant wykazał zarówno wiedzę o innych konstrukcjach tego typu jak i kreatywność w doborze sposobów rozmieszczenia mikrofonów, tak by uzyskiwać wysoką dokładność odbioru jak i równomierność wrażliwości w przestrzeni. Można oczywiście rozważać także inne rozmieszczenia mikrofonów, na przykład bazujące na technikach planowania eksperymentu, ale te zaproponowane i starannie zweryfikowane w rozprawie są w pełni wystarczające do jej celów.

Rozdziały 3 i 4 poświęcone są badaniom Autora nad tłumieniem drgań w panelach obudów urządzeń mechanicznych, w tym z ukierunkowaniem na sprzęty gospodarstwa domowego (np. pralki, suszarki itp.).

W Rozdziale 3 badany jest pojedynczy panel, do którego przymocowano elementy piezoelektryczne. Doktorant wykonał bardzo szeroki wachlarz badań, których celem było określenie skuteczności tłumienia drgań przez elementy piezoelektryczne, w zależności od sposobu odbioru od nich energii elektrycznej powstałej na skutek drgań. Badał synchroniczne tłumienie z przełączaniem (*SSD – synchronized switch damping*) dwóch rodzajów:

- z cewką indukcyjną (SSDI),
- zewnętrznym źródłem zasilania (SSDV).

Doktorant przeprowadził wnikliwe, wymagające wieloaspektowej wiedzy badania tych reguł sterowania tłumieniem drgań dla płyty stalowej i aluminiowej. Interesujące są oba układy, z tym że układ SSDV – jako układ aktywny – dawał zauważalnie lepsze tłumienie w porównaniu z półaktywnym układem SSDI. Wprawdzie mgr J. Rzepecki deklarował we Wstępie, że będzie się koncentrował głównie na układach półaktywnych, ale – w moim przekonaniu – układy SSDV mogłyby znaleźć zastosowania w sprzęcie AGD, ze względu na łatwość dostarczenia dodatkowego źródła napięcia.

W celach porównawczych Doktorant stosował także otwarty układ SSDI. Półaktywny układ sterowania SSDI (z wykrywaniem maksimum sygnału z elementu piezoelektrycznego) i układ SSDV dały znaczącą redukcję drgań w porównaniu z układ otwartym.

W Rozdziale 4 Doktorant opisał koncepcję i wyniki badań zaawansowanego materiału, złożonego z dwóch płyt i elektromagnetycznego układu tłumienia drgań. Ze względu na sposób sterowania materiał ten w pełni zasługuje na nazwę „smart" w skali makroskopowej. Ze swej strony dodałbym, że jest to dedykowany materiał inteligentny. Istotą pomysłu jest zamontowanie między płytami elektromagnesów ze rdzeniami, które poruszają się bez tarcia (a zatem także bezgłośnie). Drgania tłumione są w wyniku podawania na cewkę sygnału o zmiennej szerokości impulsów. Podkreślić należy, że system ten nie wymaga zewnętrznego źródła zasilania, a jego „dostrajanie" może odbywać się przez proste, mechaniczne regulowanie stopnia wnikania rdzenia w głąb cewki indukcyjnej. Ponadto, możliwe są różne – opisane w rozprawie – konfiguracje mocowania rdzenia i cewki oraz stosowanie układów złożonych z kilku takich elektromagnesów.

Doktorant przeprowadził bardzo szerokie badania pracy takich u kładów, poczynając od jednego elementu tłumiącego. Dodatkowo, na uznanie zasługuje opanowanie przez Doktoranta bardzo ciekawej techniki obrazowania poszczególnych modów drgań (dwuwymiarowych funkcji własnych operatora Laplace'a). Wykonywał On nakładanie kształtów owych modów i rozkładu energii w przestrzeni, przy czym energia reprezentowana jest przez paletę barw. Dzięki tej technice był w stanie ocenić zmianę rozpływu energii drgań po zastosowaniu tłumiących elementów elektromagnetycznych. W moim przekonaniu, technika ta może mieć wiele innych

zastosowań.

Doktorant wykonał wiele serii eksperymentów z jednym elementem tłumiącym, badając wpływ wypełnienia sygnałów na redukcję i rozpływ energii wibracji. Uzyskane wyniki pozwoliły mu na zaprojektowanie eksperymentów pięcioma elementami elektromagnetycznymi. W tym przypadku, dodatkowymi ważnymi czynnikami eksperymentu były położenia elementów tłumiących. Badania prowadzone były do częstotliwości 500 Hz z różnymi wartościami wypełnienia. Dzięki tak wszechstronnym i pracochłonnym eksperymentom Doktorant otrzymał kolorowe mapy zależności energii drgań w zależności od wyżej wymienionych czynników. Mapy te pozwoliły mgr J. Rzepeckiemu na sformułowanie szeregu wniosków i reguł, dotyczących doboru w/w czynników w zależności od częstotliwości, dla których pożądana jest największa redukcja energii drgań. Wnioski te sformułował także w postaci zestawu tabel i wykresów, które w czytelny sposób wskazują dobre kombinacje. Podkreślić trzeba, że przy tak wielu czynnikach wpływających na redukcję drgań nie da się wyciągnąć takich wniosków na bazie intuicji. Uzyskanie ich na bazie modeli również byłoby bardzo trudne, o ile w ogóle możliwe, ze względu na mnogość sprzężonych pól fizycznych.

W końcowej części Rozdziału 4 Doktorant opisał swoje dodatkowe badania, których celem była dodatkowa obiektywizacja uzyskanych wyników. W tym celu, przeanalizował On znane metody badania przestrzennych rozkładów funkcji własnych i do porównań wybrał znaną metodę Chladniego, którą zmodyfikował, dostosowując do swoich celów badań. Położenia materiału sypkiego rejestrowane były kamerą na podczerwień i kamerą pracującą w świetle widzialnym. Jako rezultat tych badań Doktorant uzyskał szybką metodę wstępnej oceny rozkładu grgań własnych. Jego wkład w modyfikację metody polegał także na doborze algorytmów przetwarzania obrazów z obu kamer, tak by uwypuklić badane cechy.

Wyniki opisane w Rozdziale 4 mają inny charakter niż poprzednie, lecz badania prowadzone były zgodnie z podobną metodologią i starannością. Doktorant badał tłumik drgań pojazdu kołowego (quad'a) bazujący na cieczy magneto-reologicznej (MR). Ciecz taką można rozważać jako materiał inteligentny wówczas, gdy tłumik jest właściwie sterowany. Powszechnie stosowanym algorytmem tłumienia drgań pojazdu kołowego jest algorytm znany jako Sky-hook. Na wejście podawany jest sygnał proporcjonalny do prędkości zawieszenia, rozumianej jako różnica prędkości mas: resorowanej i nieresorowanej. Zwykle do oceny prędkości stosuje się przybliżone całkowanie wyników z akcelerometru. System zaproponowany przez Doktoranta w Rozdziale 4 zasługuje na szczególną uwagę, gdyż jego celem jest poprawa tłumienia drgań poprzez nowe podejście do estymacji prędkości za pomocą pomiarów położeń i obliczaniu przyrostów. W rozprawie metoda ta nazywana jest *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT). Jak wiadomo, przybliżone różniczkowanie wrażliwe jest na błędy pomiarowe. W tym jednak przypadku okazało się, że akcelerometry wnoszą tak duże zakłócenia, że przybliżone całkowanie nie jest w stanie dostatecznie ich stłumić. W rezultacie, podejście zaproponowane przez

Doktoranta dawało lepsze efekty tłumienia drgań, co zostało w rozprawie szczegółowo udokumentowane. Na udokumentowanie to składało się szereg badań:

- wyprowadzenie równań opisujących ¼ zawieszenia, z uwzględnieniem proponowanej metody oceny prędkości i przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- porównanie tłumienia drgań wszystkich czterech kół pojazdu przy przejeździe przez prostokątną przeszkodę, przy czym testowane były zarówno przejazdy z ze sterowaniem sky-hook i akcelerometrami oraz z czujnikami LVDT,
- powyższe badania powtarzane były dla różnych wartości prądu podawanego na tłumik MR.

Uzyskane przez Doktoranta rezultaty wskazują na istotne zmniejszenie oddziaływania drgań na kierowcę w pewnych fazach ruchu, w innych fazach tłumienie jest podobne lub a q jednej z nich trochę wyższe tłumienie wykazuje stosowanie akcelerometrów. Ponadto, proponowane podejście okazało się bardziej odporne na zakłócenia, np. pochodzące od drgań silnika.

Rozprawę kończy Rozdział 6, zawierający podsumowanie rozprawy i kilka interesujących kierunków badań, które wykraczają poza zakres rozprawy.

Ocena najważniejszych rezultatów rozprawy.

Cel postawiony przez mgr J. Rzepeckiego został osiągnięty, a proponowane podejścia są oryginalne zostały zweryfikowane empirycznie.

Realizacja celu rozprawy wymagała od Autora zaproponowania szeregu oryginalnych rozwiązań szczegółowych. Zaliczam do nich:

- Badania reguł sterowania tłumieniem drgań za pomocą elementów piezoelektrycznych dla płyt dla układów SSDI i aktywnego SSDV.
- Przeprowadzenie podobnych badań dla nowego podejścia do tłumienia w oparciu o tłumiki elektromagnetyczne,
- Wprowadzenie nowego podejścia do tłumienia drgań w postaci dwóch płyt przedzielanych tłumikami elektromagnetycznymi i bardzo zaawansowana optymalizacja układu sterowania,
- Opracowanie nowego podejścia do estymacji prędkości wertykalnej pojazdu z tłumikami MR i sterowaniem typu sky-hook.

Ponadto, rozprawa wnosi wkład w techniki pomiarowe, polegające na:

- optymalizacji rozmieszczenia mikrofonów do badań przestrzennego rozkładu drgań,

- opracowaniu lub udoskonaleniu technik obrazowania funkcji własnych drgań płyt o złożonych kształtach, co pozwoliło na optymalizację materiału złożonego z dwóch płyt i tłumików elektromagnetycznych.

Sugestie dalszych badań

Nie mam uwag szczegółowych do treści rozprawy. Przedstawię tylko swoje uwagi o charakterze dyskusyjnym.

- Czy zastosowanie w układzie dwóch płyt zarówno elementów elektromagnetycznych jak i piezoelektrycznych mogłoby wpłynąć na dalszą poprawę własności tłumiących ?

- Czy równoległe stosowanie akcelerometrów i czujników LVDT wraz z odpowiednią fuzją ich wskazań mogłoby się przyczynić do jeszcze dokładniejszej estymacji prędkości ?

  Podkreślić należy, że powyższe pytania wykraczają poza ramy rozprawy.

Pozostałe osiągnięcia Doktoranta

Mgr J. Rzepecki jest współautorem 10 artykułów z listy JCR i 11 prac opublikowanych w materiałach międzynarodowych konferencji, przy czym w kilku z nich jest pierwszym autorem. Ponadto, jest współautorem patentu i 3 zgłoszeń patentowych. Zarówno publikacje jak i patenty są związane z tematyką doktoratu.

Ponadto, był realizatorem 8 projektów badawczych, w tym większości jako główny realizator, a w jednym jako lider zespołu.

Odbył miesięczny staż w Niemieckiej Agencji Kosmicznej.

KONKLUZJA

Podsumowując całokształt rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Rzepeckiego, stwierdzam, że rozprawa ta jest bardzo wartościowa i zawiera oryginalne propozycje rozwiązań problemów sterowania i optymalizacji tłumienia drgań za pomocą inteligentnych materiałów.

W związku z tym stwierdzam, że rozprawa ta spełnia z nadmiarem wszystkie wymagania stawiane zwyczajowo i ustawowo rozprawom doktorskim, w szczególności, spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o

dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wysoką jakość rozprawy oraz współautorstwo publikacji obiegu międzynarodowym powodują, że z pełnym przekonaniem wnioskuję o rozpatrzenie wniosku o wyróżnienie tej rozprawy.

Prof. Dr hab. inż. Ewaryst Rafajłowicz

Wrocław 18 maja 2022 roku