Dr hab. inż. Ryszard Leniowski, prof. PRz
Katedra Informatyki i Automatyki
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów, 31. 05. 2022 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 7.06.2022
nr 8 zał. .....

Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: ***Application of smart materials for selected vibration reduction problems***

Autor rozprawy: **mgr inż. Jarosław Rzepecki**

Promotor rozprawy: **Prof. dr hab. inż. Marek Pawełczyk**

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Jarosława Rzepeckiego, która została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚl., wyrażone w uchwale 12/2022 z dnia 15.03. 2022 r.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska podejmuje temat zastosowania inteligentnych materiałów do selektywnej redukcji drgań na przykładzie dwóch rodzajów obiektów, czyli prostopadłościennej obudowy oraz zawieszenia pojazdu kołowego - quada. To tematyka ważna i aktualna, zarówno z poznawczego jak i z aplikacyjnego punktu widzenia. Dysertacja napisana jest w języku angielskim, zawiera łącznie 111 stron i składa się z 6 rozdziałów, poświęconych kolejno:

Rozdział 1, wstępny, zawiera wprowadzenie do tematu, omówienie i podział metod aktywnych tłumienia wibracji oraz motywację do podjęcia badań. W rozdziale tym sformułowano tezę a także przedstawiono cel badań. Na końcu zaprezentowano zawartość całej rozprawy.

W **rozdziale 2,** zaprezentowano dokładny opis sprzętu laboratoryjnego wykorzystanego w badaniach, dzieląc go na trzy grupy. Pierwsza grupa to sprzęt ściśle powiązany z mechaniczną obudową szkieletową o wymiennych ścianach, których drgania są przedmiotem badań. Druga grupa sprzętu pomiarowego i inteligentnych materiałów służy do pomiaru i strojenia parametrów semi-aktywnego układu zawieszenia czterokołowego pojazdu terenowego- quada. Trzecia grupa sprzętu laboratoryjnego to akustyczna kamera wraz z niezbędnymi układami elektronicznymi. Kamera akustyczna jest płaskim układem wielu mikrofonów (48 sztuk), ułożonych w różne konfiguracje geometryczne, wpływające na własności pomiarowego układu.

Rozdział 3, poświecono omówieniu półaktywnej metody redukcji wibracji ściany obudowy z wykorzystaniem elementów piezoelektrycznych zamontowanych jednostronnie na czołowej ścianie obudowy. Metoda ta polega na rozpraszaniu energii drgań w obwodzie elektrycznym elementów piezoelektrycznych. W przypadku zwarcia elementu MFC (metoda pierwsza) w obwodzie płynie prąd proporcjonalny do generowanego napięcia i odwrotnie proporcjonalny do rezystancji obwodu. Ulepszona metoda rozpraszania energii drgań polega na kontrolowanym włączaniu/ wyłączaniu zwarcia z wykorzystaniem kluczowania elektronicznego, wspomaganego dodatkowym napięciem polaryzującym. Takie eksperymenty przeprowadzono dla dwóch płyt: stalowej i aluminiowej. W rozdziale tym analizowano stopień redukcji hałasu w oparciu o 6 punktowy pomiar ciśnienia akustycznego, przy czym lokalizacje mikrofonów wybrano arbitralnie. Wyniki wskazują, że wibracje i hałas najskuteczniej redukuje układ ze sterowanym kluczem elektronicznym.

Rozdział 4, zawiera opis metody redukcji wibracji ściany obudowy skonstruowanej w postaci dwóch paneli. Pomiędzy panelami zamocowano elektromagnesy sprzęgające, sterowane zewnętrznymi wzmacniaczami impulsowymi typu PWM. Zbadano układ z pojedynczym elektromagnesem umieszczonym na przecięciu przekątnych, oraz układ z pięcioma elektromagnesami. Element ruchomy (rdzeń), przymocowany do wewnętrznej ściany panelu generował siłę „punktową' , zaś cewka była przymocowana za pomocą łącznika do drugiego panelu, tworzącego jej podparcie (siły reakcji). Drgania struktury mierzono wibrometrem

laserowym oraz zestawem elementów MFC, pełniących rolę sensorów. Badania laboratoryjne rozkładu drgań potwierdziły zgodność z modelem symulacyjnym w stopniu zadawalającym. Potwierdzenie zgodności obu modeli zweryfikowano obserwując obrazy figur Chladniego. Ostatnia część rozdziału poświęcona jest idei redukcji drgań, polegająca na sprzężenia obu paneli za pomocą silnych, miniaturowych magnesów neodymowych.

Rozdział 5, poświecono problemowi redukcji drgań zawieszenia terenowego pojazdu czterokołowego. Wykorzystano w tym celu model zwieszenia z dwoma masami drgającymi, symulującymi koło i „ramę" (wraz ze wszystkimi elementami konstrukcyjnymi) oraz układem dwóch sprężyn o stałych parametrach i trzech tłumikach (opona - jeden tłumik ze stałym współczynnikiem, dwa tłumiki zawieszenia: jeden o stałym, drugi o zmiennym współczynniku tłumienia). Proponowane rozwiązanie półaktywnego zawieszenia wykorzystuje tłumiki magneto-reologiczne sterowane prądowo. Wartość prądu jest z kolei obliczana na podstawie prędkości drgań, algorytmem Skyhook. Testowanie układu badano podczas pokonywania niewielkiej przeszkody terenowej, w postaci belki ułożonej poprzecznie do kierunku jazdy. Do oceny działania tłumika wykorzystano przebieg przyspieszenia działającego na kierowcę pojazdu.

Rozdział 6, to podsumowanie, w którym Doktorant przedstawił w sposób syntetyczny wykonane prace i uzyskane rezultaty oraz plan dalszych prac.

Rozprawę uzupełnia spis literatury, który liczy 115 pozycji. Literatura przedmiotu cytowana przez Autora jest zasadniczo właściwie dobrana i w większości anglojęzyczna. Układ pracy jest poprawny. Praca zawiera spis używanych skrótów, listę tabel oraz listę ilustracji. Treści rozprawy zostały logicznie podzielone na rozdziały, a ich zawartość i zakres nie budzi zastrzeżeń.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Zagadnienia poruszone w dysertacji dotyczą półaktywnej redukcji drgań z zastosowaniem inteligentnych materiałów.

W pracy doktorskiej Autor proponuje rozwiązanie, w którym do aktywnej redukcji drgań wykorzystuje zasadę kontrolowanej sztywności układu, osiąganej opisywanymi w pracy metodami.

Cel rozprawy został sformułowany następująco:

Celem niniejszej rozprawy jest weryfikacja możliwości skutecznego zastosowania elementów opartych na inteligentnych materiałach w celu redukcji drgań zawieszenia pojazdu i obudowy urządzenia, stanowiących przykłady wybrane spośród szerokiej gamy zastosowań.

Na potrzeby realizacji tak sformułowanego celu Doktorant sformułował następującą tezę:

Możliwa jest efektywna redukcja drgań struktur mechanicznych dzięki wykorzystaniu materiałów inteligentnych, opartych na zjawisku indukcji elektrycznej lub elektromagnetycznej w celu kontroli sztywności struktury w wybranych obszarach lub tłumienia drgań w wybranych punktach struktury.

Doktorant dążył do udowodnienia tej tezy w następujących krokach:

1. Zbudował, skonfigurował i skalibrował złożone stanowisko laboratoryjne z komputerowym systemem pomiarowo-sterującym, na którym przeprowadził szereg testów weryfikujących założoną koncepcję. Otrzymane wyniki doświadczalne porównał z wynikami symulacyjnymi uzyskanymi z programów wykorzystujących metody FEM. Należy podkreślić, że eksperymenty cechuje wysoka rzetelność i profesjonalność. Doktorant wykorzystuje różne metody i technologie pomiarowe, co podwyższa ocenę uzyskanych wyników.
2. Badając drgania układów płaskich, w pierwszej kolejności szczegółowo przeanalizował postaci drgań kwadratowej płyty aż do 11 modu włącznie. Wychodząc z „obrazów" drgań otrzymanych metodą symulacyjną (oprogramowanie FEM), zmierzył rozkład drgań na stanowisku laboratoryjnym różnymi alternatywnymi metodami:
   a) z zastosowaniem sensorów MFC,
   b) z zastosowaniem mikrofonów (analiza pola akustycznego),
   c) z zastosowanie wibrometru laserowego
   d) z zastosowaniem układu wizyjnego (obserwacja obrazów Chladni).

   Dzięki fuzji pomiarów uzyskano wiarygodne i wartościowe wyniki.
3. Dla układów płaskich Doktorant opracował oryginalne metody praktycznego modyfikowania sztywności, poprzez wprowadzenie własnych rozwiązań technicznych. Zaproponował trzy sposoby, a mianowicie:

a. Pierwsza polega na rozpraszaniu energii drgań w obwodzie elektrycznym elementów piezoelektrycznych, poprzez kontrolowane zwieranie elementu MFC za pomocą klucza elektronicznego.
b. Druga metoda redukcji wibracji ścian obudowy wykorzystuje własności, jakie daje układ w postaci dwóch „sprzężonych" paneli. Pomiędzy panelami zamocowano elektromagnesy sprzęgające, sterowane zewnętrznymi wzmacniaczami impulsowymi typu PWM. Zbadano układ z pojedynczym elektromagnesem umieszczonym w geometrycznym środku panelu, oraz układ z pięcioma elektromagnesami. Idea metody polega na tym, że element ruchomy (rdzeń), przymocowany do wewnętrznej ściany panelu generuje siłę punktową, zaś reakcja w cewce jest przenoszona za pomocą przymocowanego łącznika do drugiego panelu, tworzącego jej podparcie.
c. Trzecia metoda redukcji drgań polega na wytworzeniu pary sił pomiędzy panelami za pomocą układu miniaturowych magnesów neodymowych, przymocowanych do tych paneli. Jest to metoda pasywna, ale może być uzupełnieniem metod aktywnych.

4. Dla układu o parametrach skupionych, czyli zawieszenia pojazdu terenowego, Doktorant zaproponował aktywny układ z tłumikiem magneto-reologicznym sterowanym prądowo. Nowością jest wykorzystanie metody fuzji danych pomiarowych pochodzących z sensorów MEMS (wykorzystano przyspieszenie) oraz z LVDT (rodzaj transformatora różnicowego), połączone z estymatorami parametrów ruchu (tu prędkości). W ten sposób eliminuje się wady niektórych sensorów tworzących zestaw pomiarowy i jednocześnie poprawia się jakość pomiarów.

Zaprezentowanie stanowiska nie obejmują wprawdzie wielu ważnych przykładów zastosowania semi-aktywnej metody redukcji drgań, warto jednak zauważyć, że są one reprezentatywne dla szerokiej grupy problemów. Dla wszystkich opisanych przykładów proponowane metody działają, skutecznie redukując większość składowych modalnych. Wartość pracy jest widoczna również w tym, że Doktorant szczegółowo omawia napotkane problemy, jakie wystąpiły podczas badań laboratoryjnych, wskazuje na ich wzajemne zależności i proponuje ich rozwiązanie.

Ponadto Autor proponuje metody oceny wibracji oparte o analizę obrazów- rozkładu linii węzłowych (metoda Chladini) jakie powstają w trakcie drgań obiektów o parametrach rozłożonych.

Wymienione osiągnięcia mogą stanowić podstawę do dalszych badań i wnoszą wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej wymieniam kilka uwag krytycznych lub dyskusyjnych, które nasunęły mi się po przeczytaniu pracy:

1. Na rysunkach 2.3 oraz 2.4 przedstawiono wyniki symulacyjne płyt o parametrach podanych w tabeli 2.1. Wynika z niej, że płyta jest jednorodna i ma kształt kwadratu. Skąd zatem biorą się różnice w częstotliwościach, zamieszczone pod rysunkami, np. 2.3 (mod 2) 2.3 (mod 3). Są to identyczne stany różniące się orientacją (obrót o kat 90 stopni), ale wartości częstotliwości są różne. Takich układów jest więcej. Czy jest to błąd metody numerycznej, wykorzystywanej w oprogramowaniu FEM?

2. Elektromagnesy (duże) z rdzeniem wykonawczym trudno nazwać materiałem inteligentnym. Można byłoby wprowadzić nawę bardziej adekwatną, biorąc pod uwagę skalę przedmiotu. Proponowane rozwiązanie może stanowić dobry punkt wyjścia do kolejnej konstrukcji, znacznie zminiaturyzowanej i tak skonstruowanej aby panele z elektromagnesami stanowiły jednorodny materiał, który można docinać na dowolny wymiar.

3. Analizując obrazy 2.12 można zaobserwować następującą prawidłowość: im geometryczna konfiguracja rozkładu mikrofonów na płaszczyźnie jest bliższa geometrycznej konfiguracji natężenia dźwięku, tym pomiar jest lepszy. Jest to prawidłowość obserwowana również w nieliniowych transformacjach przestrzeni. Warto by z niej skorzystać analizując obrazy z akustycznej kamery. Ponadto, dobierając geometryczną konfigurację mikrofonów warto kierować się własnościami topologicznymi powierzchni. Wśród podanych propozycji brakuje sitki trójkątnej oraz sześciokątnej.

4. Dyskusyjny jest komentarz do rys. 3.6. (przebieg zaznaczony kolorem niebieskim). Tracenie energii poprzez zwarcie układu jest metodą stosowaną powszechnie w układach napędowych (metoda hamowania przeciwprądem). Wydaje się, że układ z rys. 3.2b powinien jednak lepiej działać niż ten z rys. 3.2a.

5. Z rys.3.4 oraz 3.11 wynika, że sterowanie (generatorem?) jest prowadzone w układzie otwartym, czy tak?

6. Rys.4.1 powinien być poprawiony. Część (a), gdzie cewka jest przymocowana do drgającego panelu opisuje deformacje powierzchniowe, równoległe do panelu. Pozostałe rysunki (b) oraz (c) odpowiadają deformacjom prostopadłym do powierzchni, są to zupełnie odmienne zjawiska.

7. Kształt rdzenia (rys.4.7) o mocowaniu przypominającym monetę powoduje powstanie siły rozproszonej (zasada Saint-Venanta) stąd modele płyt (3.5), (3.8) powinny być uzupełnione o dodatkowe składniki.

8. Podobnie, wprowadzenie mas (elektromagnesów) tak jak pokazano to na rys.4.13 jest równoważne dodaniu do modelu (tego z pkt.7) mas skupionych, zmieniających własności dynamiczne obiektu.

9. W okresie ostatnich 10 lat nastąpiła znacząca poprawa dokładności pomiarów z zastosowaniem MEMS (elektronika i oprogramowanie). Warto o tym wspomnieć w kontekście stosowanych wzorów (5.8) i (5.9). Wiadomo, że istnieją zdecydowanie lepsze metody estymacji prędkości, o nieco wyższej złożoności obliczeniowej, ale zapewniające, że błąd jest nawet o dwa rzędy niższy.

10. Analiza działania solenoidu zasilanego z generatora PWM nie uwęglenia wielu czynników, które prowadzą do silnie nieliniowych charakterystyk pokaźnych na rysunku 4.3 i kolejnych. Z pewnością wpływają one na jakość pracy toru wykonawczego. Wybierając metodę modulacji warto kierować się ich zaletami i ograniczeniami. Najmniejsze zniekształcenia harmoniczne (przy identycznych, lub zbliżonych innych parametrach) ma modulator $\Sigma - \Delta$, Aby poprawić liniowość generowanej siły w funkcji współczynnika wypełnienia, warto byłoby zamienić generator piłokształtny (standard) innym sygnałem periodycznym.

4. Uwagi natury redakcyjnej

Praca jest zredagowana starannie i Recenzent nie zauważył istotnych uchybień edycyjnych. Zawiera dużą liczbę ilustracji (w większości kolorowych), co bardzo ułatwia analizę otrzymanych rezultatów pochodzących z badań laboratoryjnych. Mniej istotne usterki to:

a. Spis oznaczeń: PSD oraz PDSa, podobne symbole, różne znaczenia. To generuje pewne zamieszanie, gdy czytelnik napotyka skróty w tekście.
b. Str. 22, 8 w (wiersz), d (od dołu): jest one-, two- …. , raczej one, two or three.
c. Str. 34, 8 w, d: jest …MFCs, powinno być MFC's .
d. Str. 87, 7 w, g: jest $x_0 - x_2$, powinno być $x_0, x_1, x_2 \ldots$.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że Doktorant dowiódł postawionej tezy, wnosząc tym samym wkład w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*. Uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jarosława Rzepeckiego spełnia 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.

Ryszard Leniowski