

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mariusza Ostrowskiego

pt. *"Semi-active control of energy transfer between vibration modes in mechanical structures"*

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Bartłomiej Błachowski, prof. IPPT PAN

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Mikułowski

Ocenę opracowano na zlecenie sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów PAN.

1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY, CEL I ZAKRES PRACY

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej pt. *"Semi-active control of energy transfer between vibration modes in mechanical structures"* zawarto oryginalną propozycję półaktywnego sterowania drganiami konstrukcji ramowej w celu redukcji drgań lub też odzyskiwania energii. Zaproponowano sterowanie drganiami struktury oparte na blokowaniu i odblokowywaniu połączeń rotacyjnych wybranych węzłów co powoduje zmianę liczby stopni swobody i pozwala na wymianę energii mechanicznej pomiędzy wybranymi postaciami drgań.

Podjęty temat badawczy uważam za ciekawy i ważny z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia. Uzyskane wyniki mają wpływ na projektowanie konstrukcji ramowych w celu optymalnego doboru parametrów oraz dostosowanie odpowiedzi struktury do zadanych obciążeń dynamicznych. Uzyskane wyniki mogą mieć ważne aspekty praktyczne np. w zastosowaniu do struktur kosmicznych, robotyce itp.

Analizowane w pracy problemy wymagały od Doktoranta dogłębnego zrozumienia podstaw teorii drgań w tym analizy modalnej, sterowania, optymalizacji oraz ich opisu matematycznego z uwzględnieniem efektów nieliniowych, a ponadto zaplanowania i przeprowadzenia eksperymentu oraz poprawnej analizy uzyskanych wyników.

Rozprawa doktorska składa się z sześciu głównych rozdziałów, załącznika, bibliografii, wykazu publikacji będących efektem pracy doktorskiej, podziękowań oraz streszczeń w języku polskim.

We wprowadzeniu Doktorant dokonał krytycznego przeglądu literatury, który wykonał systematycznie przedstawiając prace z zakresu sterowania drganiami: pasywnego, aktywnego, semi-aktywnego, sterowania postaciami drgań, podkreślając zalety i wady różnych rozwiązań. Ponadto dokonał przeglądu literatury z zakresu metod odzyskiwania energii oraz urządzeń (harwesterów) które mogą być zastosowane do struktury analizowanej w pracy doktorskiej.

Na tej podstawie sformułował cel i zakres pracy oraz przedstawił podstawowe założenia. Postawił też tezę badawczą w której stwierdził, że dynamiczna zmiana konfiguracji struktury ramowej poprzez blokowanie i odblokowywanie przegubów obrotowych może być wykorzystana do precyzyjnego transferu energii mechanicznej pomiędzy postaciami drgań, co umożliwi redukcję drgań struktury oraz zwiększy efektywność w przypadku odzyskiwanej energii. Precyzyjnie podane zostały założenia dotyczące struktury w zakresie modelowania, analizy i przeprowadzonych badań w pracy doktorskiej. Dowód na prawdziwość postawionej tezy przy przyjętych założeniach przeprowadzony jest stopniowo w kolejnych rozdziałach pracy.

W rozdziale 2 przedstawiony jest model struktury o dwóch stopniach swobody z blokowanymi połączeniami. Zaproponowano aby blokowanie połączeń w węzłach odbywało się za pomocą dużej wartości tłumienia wiskotycznego co uprościło opis matematyczny struktury. Przedstawiono również koncepcję wykonania przegubu blokowanego elementem trącym z możliwością sterowania poprzez aktywny piezo-stos. Badany model jest przedziałami liniowy ale jest nieliniowy biorąc pod uwagę całość badanego przedziału współrzędnych uogólnionych. Model o dwóch stopniach swobody został uogólniony na układ o wielu stopniach swobody dla którego zapisano równania dynamiki w postaci macierzowej. Na tej podstawie przeprowadzono analizę modalną oraz zbadano efekt sprzężenia postaci drgań w przypadku wszystkich węzłów odblokowanych oraz określono wpływ na postacie w przypadku zablokowania wybranych węzłów. Na podstawie sformułowanego modelu określono przepływ energii pomiędzy postaciami drgań.

Rozdział 3 poświęcony jest opracowaniu algorytmu semi-aktywnego sterowania drganiami struktury. W tym celu konieczne było oszacowanie energii transferowanej

między postaciami do czego konieczne było wyznaczenie momentów gnących przenoszonych w zablokowanych węzłach. Momenty te wyznaczono poprzez pomiar odkształceń w pobliżu blokowanych węzłów. Ponadto konieczne było wyznaczenie prędkości modalnych wybranych postaci. Na tej podstawie sformułowano algorytm sterowania w pętli sprzężenia zwrotnego. Istotnym zadaniem było optymalne rozmieszczenie czujników w celu minimalizacji szumów. Do tego celu wykorzystano macierz informacji Fishera a zadanie wyznaczenia maksimum wyznaczono zaproponowaną przez Doktoranta przybliżoną metodą wypukłej relaksacji. Kolejnym ważnym problemem, dogłębnie przeanalizowanym w tym rozdziale, było zagadnienie sterowalności. Zaproponowano miary sterowalności w przypadku redukcji drgań oraz w przypadku odzyskiwania energii, a następnie sformułowano funkcję celu, jako sumę ważoną energii dla monitorowanych postaci drgań i optymalne prawo sterowania zapewniające najbardziej stromy spadek tej funkcji. Kluczowe znaczenie miał dobór wag który decyduje o przepływie energii. Dobór wag zależny jest od zadanego celu, redukcji drgań lub też odzyskiwania energii. Doktorant bardzo świadomie opracował algorytm sterowania optymalnego biorąc pod uwagę również ograniczenia sprzętowe oraz unikanie niepożądanych efektów np. szarpnięcia. Poprawność działania zaproponowanych algorytmów sprawdzono numerycznie na przykładzie układu o dwóch stopniach swobody.

W rozdziale 4 przeprowadzono symulacje numeryczne ramy ośmioprzęsłowej z dwoma blokowanymi połączeniami. Model ramy jako struktury płaskiej opracowano w systemie MES bazując na teorii belek Eulera-Bernoulliego. Symulacje przeprowadzono dla dwóch wariantów tj. optymalnego położenia węzłów blokowanych oraz nieoptymalnego w celu wykazania różnic. Jakość zaproponowanej metody sterowania oceniono porównując ją z metodą Prestress Accumulation–Release (PAR). W przypadku redukcji drgań, przy odpowiednim doborze wag, metoda zaproponowana w pracy doktorskiej okazała się skuteczniejsza od metody PAR, zarówno dla drgań własnych jak i wymuszonych okresowo i losowo, przy mniejszej liczbie przetęczy blokowanych węzłów. W przypadku odzyskiwania energii uwzględniono model przetwornika elektromechanicznego który dostrojono do pierwszej lub drugiej postaci drgań. W symulacjach wykazano, że w przypadku różnych wymuszeń przenoszenie energii pomiędzy postaciami poprawia wydajność przetwornika.

Opracowany model oraz koncepcja sterowania zostały zweryfikowane poprzez badania doświadczalne (rozdział 5) wykonane na ramie wysięgnikowej trójpłaszczyznowej z sześcioma blokowanymi węzłami. Węzły były zablokowane poprzez wewnętrzne sprężyny dociskające

elementy cierne. Poprzez aktywację piezo stosu następowało odblokowywanie pary cierniej. Na wstępie wykonano eksperymentalną analizę modalną wybierając do dalszej analizy postacie drgań w jednej płaszczyźnie. Na tej podstawie skalibrowano płaski model MES struktury. Zaproponowany model sterowania zastosowano na prototypie ramy oraz na modelu numerycznym w celu porównania wyników. W przypadku drgań własnych oraz wymuszonych rejestrowano przemieszczenia i przyspieszenia swobodnego końca konstrukcji. Wykazano skuteczność metody w redukcji wybranej postaci drgań poprzez odpowiedni dobór wag algorytmu sterowania i transfer energii do wyższych postaci. Niemniej jednak wystąpiły rozbieżności pomiędzy wynikami numerycznymi i doświadczalnymi które były nieco gorsze niż wyniki symulacji. Przyczyny tych rozbieżności zostały zidentyfikowane i dokładnie wyjaśnione w pracy.

W rozdziale 6 zawarto wnioski końcowe w zakresie modelu matematycznego, przyjętej koncepcji sterowania przepływem energii pomiędzy postaciami drgań oraz uzyskanych wyników doświadczalnych i ich znaczenia praktycznego. W załączniku zawarto wyniki eksperymentalnej 3D analizy modalnej wykonanej za pomocą młotka modalnego oraz trójkierunkowego czujnika przyspieszeń. Wykazie literatury zawarto 165 publikacji, dobrze skorelowanych tematycznie z pracą, w tym zacytowano publikacje Doktoranta.

2. OCENA METODYKI BADAŃ ORAZ UZYSKANYCH WYNIKÓW

Przedstawiona praca stanowi oryginalne opracowanie Doktoranta w zakresie badań modelowych, modeli matematycznych i numerycznych oraz doświadczalnych które posłużyły do dostrojenia modelu oraz weryfikacji zaproponowanej koncepcji sterowania. Zakres pracy obejmuje zagadnienia mechaniki strukturalnej, teorii drgań, teorii sterowania, optymalizacji, planowania i przeprowadzenia eksperymentu oraz analizy sygnałów. Praca napisana jest bardzo starannie, a układ pracy jest bardzo logiczny. Zaproponowana koncepcja sterowania przedstawiona jest najpierw na przykładzie prostego układu, na którym przedstawiony jest efekt blokowania węzłów i jego wpływ na mechanikę struktury, a następnie model uogólniono na dowolną liczbę stopni swobody. Wyprowadzając model matematyczny Doktorant równocześnie brał pod uwagę rzeczywistą strukturę w której musiał uwzględnić wielkości mierzalne oraz ulokowanie czujników pomiarowych w celu wyznaczenia algorytmu optymalnego sterowania. Badania oparte na modelach analitycznych wspomagane były

symulacjami metodą elementów skończonych, zaś końcowe rozwiązania zweryfikowane na demonstratorze w laboratorium.

Wyprowadzenie modeli analitycznych i numerycznych dla wszystkich analizowanych przypadków omówionych w rozprawie doktorskiej wymagało od Doktoranta dużego nakładu pracy oraz wykazania się odpowiednim przygotowaniem merytorycznym. Badania doświadczalne potwierdzające poprawność modeli oraz wyników symulacji numerycznych istotnie dopełniają zawartość pracy doktorskiej i podnoszą jej jakość.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam wyprowadzenie modeli matematycznych pozwalających na zbadanie wpływu blokowania węzłów na mechanikę struktury, zaproponowanie własnej koncepcji sterowania semi-aktywnego oraz optymalizacji algorytmu sterowania tj. optymalnego doboru umiejscowienia blokowanych węzłów i umiejscowienia czujników pomiarowych. Na uwagę zasługuje bardzo dobre i przemyślane zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentu oraz krytyczna analiza uzyskanych wyników. Wykonane powyżej badania i uzyskane wyniki są oryginalnym wkładem Autora w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Zaproponowana koncepcja sterowania może być wykorzystana w praktyce, w projektowaniu struktur ramowych w celu redukcji drgań lub odzyskiwania energii.

3. PYTANIA I UWAGI KRYTYCZNE

Praca napisana jest bardzo starannie, zaproponowane modele są poprawne a uzyskane wyniki są spójne i logiczne. Podczas czytania pracy nasunęły mi się jedynie nieliczne drobne uwagi.

Na str. VII używany jest zwrot pozyskiwanie energii. Jest to niepoprawne językowo, choć powszechnie używane. Pozyskać można np. czyjś szacunek, przyjaciół, stronników itp. ale nie poprawnie pozyskać np. ropę naftową, surowce, energię, itp.

Na rys.2.8 linia przerywana nie jest widoczna. Czy oznacza to że jest ona przykryta inną linią ciągłą, czy też brakuje tej linii na rysunku ?

str. 76 linia 7 od dołu, „in the basis” raczej powinno być „on the basis”

str. 84 linia 13 od dołu, „the can only” – skreślić “the”

str. 119 Eq.(4.11) – proszę o wyjaśnienie poprawności tych równań w odniesieniu do rysunku Fig.4.24 (a). Odształcenie sprężyny k powinno wynikać z różnicy przemieszczeń jej końców.

str.143, masowy moment bezwładności blokowanych węzłów został podzielony w pewnej proporcji. Proszę o uzasadnienie z czego wynika ta proporcja.

str. 164 linia 5, podwójne „decrease”

str. 184. linia 5 i 6 podwójne „has”

Proszę o skomentowanie i wyjaśnienie wniosku ze str. 182 linia 6, że całkowita energia transferowana jest sumą energii wynikającej z blokowania węzłów.

„Another important observation for the control purposes is that total modal energy transfer rate is sum of modal energy transfer rates resulting from locking of each particular joint.”

Proszę również o wypowiedź na publicznej obronie jaki wpływ na jakość zaproponowanego sterowania mogą mieć nieliniowości geometryczne struktury wynikające z jej dużych deformacji. Przyjęty w pracy model jest nieliniowy ale wynika to z blokowania węzłów. Natomiast niezależnie od tego przy podatnych konstrukcjach występują nieliniowości geometryczne.

Proszę również o komentarz na temat wpływu tłumienia na zaproponowane sterowanie, tj. tłumienia w węzłach oraz tłumienia strukturalnego.

Kolejny problem to czy opóźnienia czasowe występujące w rzeczywistym układzie miały wpływ na jakość sterowania.

4. OCENA ROZPRAWY I WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana praca zawiera oryginalne wyniki badań naukowych uzyskanych przez Doktoranta. Zastosowane metody analityczne, numeryczne i doświadczalne umożliwiły opracowanie modelu ramy z blokowanymi węzłami oraz koncepcji sterowania postaciami drgań. Szczegółowe analizy numeryczne pozwoliły na optymalizację zastosowanych algorytmów, a przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły poprawność przeprowadzonej analizy i wykazały skuteczność przyjętej koncepcji sterowania. Biorąc pod uwagę całość pracy tj. jej wartość poznawczą oraz wkład własny Autora stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Mariusza Ostrowskiego pt. *"Semi-active control of energy transfer between vibration modes in mechanical structures"* spełnia wymagania stawiane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym w odniesieniu do prac doktorskich. Wnioskuje zatem o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę opracowane modele, zaawansowane obliczenia analityczne i numeryczne, oryginalność i zakres pracy, doświadczalną implementację zaproponowanej metody oraz dorobek publikacyjny Doktoranta wnioskuję o jej wyróżnienie.

Jerzy Warmiński

