

Warszawa, 24 lutego 2025 roku

Dr hab. inż. Andrzej Myśliński, prof. instytutu
Instytut Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6
01-447 Warszawa
e-mail: myslinsk@ibspan.waw.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej magistra inż. Mariusza Ostrowskiego
pt. "Semi-active control of energy transfer between vibration modes in mechanical structures"

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN Pana prof. dr hab. Zbigniewa Ranachowskiego, wyrażone w piśmie z dnia 13 grudnia 2024 r.

1. Cel i teza rozprawy

Rozprawa doktorska mgra Mariusza Ostrowskiego (Autor) poświęcona jest opracowaniu oraz numerycznej i eksperymentalnej weryfikacji metod półaktywnego sterowania modalnego drganiami układów mechanicznych na przykładzie konstrukcji ramowych.

Zagadnienia tłumienia drgań systemów mechanicznych oraz pozyskiwania i magazynowania energii pochodzącej z tych drgań są od wielu lat przedmiotem intensywnych interdyscyplinarnych badań. Drgania maszyn i/lub budynków wywoływane różnymi zakłóceniami wywierają szkodliwy wpływ na te obiekty. Prowadzą do obniżenia ich funkcjonalnej użyteczności, zniszczenia, generują hałas, obniżają komfort pracy użytkowników. Z tych powodów od wielu lat starano się zapobiegać przyczynom powstawania drgań lub rozwijać skuteczne metody ich tłumienia. Początkowo były to pasywne metody tłumienia drgań a ostatnio pół-aktywne albo aktywne realizowane jako zadania sterowania optymalnego.

Przedmiotem rozprawy jest zaproponowanie, przeanalizowanie oraz numeryczne i eksperymentalne zweryfikowanie metod pół-aktywnego modalnego tłumienia (ang. vibration attenuation) drgań konstrukcji ramowych oraz metod odzyskiwania energii z generowanych drgań (ang. energy harvesting). Rozważane w rozprawie zadania tłumienia drgań konstrukcji ramowych są formułowane jako zadania sterowania optymalnego dla systemów opisywanych układami dwuliniowych równań różniczkowych zwyczajnych ze współczynnikami zależnymi od funkcji sterowania. Wskaźnikiem jakości jest funkcja Lapunowa opisująca energię układu mechanicznego. Minimalizacja tej funkcji wyznacza zero-jedynkową funkcję sterowania optymalnego. Ponadto wyznacza się optymalny rozkład sensorów monitorujących stan drgającej konstrukcji poprzez minimalizację macierzy informacji Fishera. Proponuje się również macierz sterowalności opartą o przepływ energii przez węzły konstrukcji, pozwalającą spośród kandydujących węzłów wybrać te które, staną się sterującymi. Zaproponowana metoda jest wykorzystywana zarówno do tłumienia drgań jak i odzyskiwania energii drgań mechanicznych. Opisane algorytmy zostały wdrożone i przetestowane numerycznie. Zostały one wykorzystane do tłumienia drgań 8 sekcyjnej konstrukcji ramowej oraz pozyskania energii z drgającej 2 sekcyjnej konstrukcji ramowej. Uzyskane wyniki Autor bardzo dokładnie przedyskutował i porównał z rozwiązaniami uzyskanymi w literaturze. Zaproponowany przez niego algorytm sterowania w każdym przypadku wyznaczał lepsze rozwiązania i wykazywał wyższą efektywność niż opisana w literaturze. Ponadto opisane algorytmy zostały zweryfikowane

eksperymentalnie. Autor szczegółowo przedyskutował otrzymane wyniki, w tym słabe strony zaproponowanych algorytmów sterowania pół-aktywnego.

Teza rozprawy sformułowana na str. 27 stwierdza, między innymi, że „*Dynamiczna rekonfiguracja konstrukcji ramowej oparta na blokowaniu lub odblokowaniu jej węzłów rotacyjnych może być wykorzystana do precyzyjnego transferu energii mechanicznej pomiędzy wybranymi częstotliwościami drgańTaka rekonfiguracja jest uogólnieniem metody uwalniania naprężeń wstępnych (ang. Prestress Accumulation Release) i oprócz redukcji drgań może być wykorzystana do zwiększenia efektywności odzyskiwania energii*”. Tezę tę Autor uzasadnia w dalszej części rozprawy.

Sformułowana w powyższy sposób teza rozprawy wskazuje, że jej przedmiotem jest analiza i rozwiązanie złożonego problemu technicznego z zakresu modalnego sterowania drganiami konstrukcji ramowych. Wybór tematyki rozprawy zmierzający do opracowania efektywnych algorytmów modalnego pół-aktywnego sterowania drganiami konstrukcji uważam za zasadny, a rozważane w niej problemy są istotne i aktualne zarówno dla teorii jak i praktyki współczesnych metod tłumienia drgań konstrukcji. Rozważane problemy sterowania drganiami stanowią bez wątpienia istotne wyzwanie konstrukcyjne oraz algorytmiczne, gdyż ze względu na złożoność problemu wyznaczanie dokładnych rozwiązań w czasie rzeczywistym jest praktycznie niemożliwe i istnieje potrzeba opracowania algorytmów tłumienia drgań konstrukcji działających skutecznie i możliwie szybko. W tym celu Autor opracował oryginalną konstrukcję blokowanego węzła łączącego belki konstrukcji ramowej, oryginalne metody rozmieszczenia sensorów i węzłów blokowanych w badanej konstrukcji, chwilowo optymalne prawo sterowania przepływem energii pomiędzy poszczególnymi modami drgań wykorzystywane albo do tłumienia drgań albo do odzyskiwania energii drgań. Proponowane metody zostały zweryfikowane zarówno numerycznie jak i eksperymentalnie.

Podjęte przez Autora wyzwania badawcze wpisują się we współczesne trendy rozwoju tej dziedziny, która rozszerza swój obszar zainteresowań z metod monitorowania i kontrolowania na metody sterowania drganiami. Zaproponowane w rozprawie metody i algorytmy sterowania drganiami mają zastosowanie praktyczne w tłumieniu drgań budynków, mostów czy pojazdów mechanicznych.

Należy dodać, że tekst rozprawy opiera się na 14 publikacjach Autora powstałych w latach 2019-2024 we współpracy z Promotorem, Promotorem Pomocniczym oraz członkami zespołu projektowego. Pięć z tych prac zostało opublikowanych w czasopismach międzynarodowych o wysokiej renomie, dziewięć w materiałach konferencji międzynarodowych. Doktorant jest pierwszym autorem 8 publikacji. Oznacza to, że proponowane rozwiązania zostały poddane weryfikacji międzynarodowej społeczności akademickiej co znacząco wzmacnia przedstawione w rozprawie idee i wyniki.

2. Zawartość rozprawy

Tekst 211 stronicowej rozprawy napisanej w języku angielskim został podzielony na 6 rozdziałów, 1 załącznik oraz spis literatury. W rozdziale 1 Autor sformułował cele i tezę rozprawy a także dokonał przeglądu literatury z zakresu modalnego sterowania konstrukcjami mechanicznymi.

Dynamiczne modele drgających konstrukcji ramowych dla dwóch i wielu stopni swobody opisano w rozdziale 2. Modele te sformułowano w postaci równań różniczkowych zwyczajnych. Jeden ze współczynników tego równania jest zależny od funkcji sterowania aktywującej albo dezaktywującej blokowanie węzła łączącego elementy konstrukcji. Ponadto w rozdziale tym dokładnie omówiono i przedyskutowano zmianę konfiguracji belek konstrukcji ramowej w różnych fazach drgań. Na str. 52-53 omówiono konstrukcję i działanie węzła umożliwiającego blokowanie albo odblokowanie belek konstrukcji.

W rozdziale 3 zaproponowano i opisano metodę pół-aktywnego sterowania modalnego drganiami

konstrukcji ramowej. W szczególności przedstawiono mieszaną hierarchiczną strukturę sterowania konstrukcją ze sprzężeniem zwrotnym, metodę oraz algorytm optymalnego rozkładu sensorów, prawo sterowania drganiami modalnymi oraz implementujący je algorytm uzależniający chwilową wartość funkcji sterowania optymalnego od znaku i wartości pochodnej funkcji Lapunowa.

W rozdziale 4 omówiono wyniki testów numerycznych metod wprowadzonych w rozdziale 3. W sekcji 4.1 przebadano zjawisko tłumienia drgań. Obliczenia przeprowadzono dla konstrukcji ramowej złożonej z 8 sekcji posiadającej 26 stopni swobody, wyposażonej w 2 sensory umieszczone optymalnie albo nieoptymalnie. Konstrukcja była poddana zarówno drganiom swobodnym, wymuszonym harmonicznym oraz przypadkowym. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność proponowanych metod tłumienia drgań względem metod pasywnej i PAR. W sekcji 4.2, dla konstrukcji złożonej z 2 sekcji i posiadającej 8 stopni swobody, omówiono wyniki testów numerycznych metod z rozdziału 3 w odzyskiwaniu energii pochodzącej z drgań. Omówiono strukturę elektromagnetycznego urządzenia odzyskującego energię oraz jego współdziałanie z konstrukcją znajdującą się w dwóch różnych konfiguracjach. Uzyskane wyniki i Tabela 4.8 na str. 134 wskazują, że zaproponowana metoda odzyskiwania energii pozwala zgromadzić co najmniej o 7% więcej energii niż metoda sterowania pasywnego.

Rozdział 5 poświęcony jest omówieniu wyników weryfikacji eksperymentalnej metod sterowania wprowadzonych w rozdziale 3 w tłumieniu drgań swobodnych i wymuszonych. Eksperymenty przeprowadzono z wykorzystaniem konstrukcji ramowej z 6 węzłami blokowanymi. Aby wyznaczyć niezbędne parametry modalne dla algorytmu sterowania opracowano model numeryczny tej konstrukcji posiadający 145 stopni swobody. Model ten skalibrowano w oparciu o dane eksperymentalne. Algorytm sterowania zaimplementowano na sterowniku FPGA. Wykazano przeniesienie energii do drgań wyższego rzędu poza zakresem wzbudzenia konstrukcji przez wzbudnik. Omówiono rozbieżności pomiędzy wynikami numerycznymi oraz eksperymentalnymi. Dla drgań wymuszonych przetestowano eksperymentalnie i omówiono możliwość przenoszenia energii drgań pomiędzy wybranymi postaciami (modami) drgań.

W rozdziale 6 omówiono najważniejsze wyniki uzyskane w rozprawie i wskazano kierunki dalszych prac badawczych. W załączniku 1 zamieszczono 25 rysunków przedstawiających kształt drgającej eksperymentalnej konstrukcji w przestrzeni trójwymiarowej, częstotliwość swobodną drgań oraz współczynnik tłumienia.

Rozprawę zamyka spis literatury składający się ze 165 pozycji obejmujący zarówno monografie jak i artykuły publikowane w czasopismach oraz materiałach konferencyjnych o zasięgu międzynarodowym dotyczące aktywnego i półaktywnego modalnego tłumienia drgań konstrukcji, odzyskiwania energii mechanicznej z drgań, monitorowania stanu konstrukcji, metod numerycznych. Wśród pozycji literatury umieszczono również wskazane wyżej prace Doktoranta.

3. Ocena merytoryczna

Rozprawa zawiera obszerny przegląd literatury przedmiotu dotyczący metod aktywnego lub półaktywnego sterowania drganiami. Wskazuje to na rozległą wiedzę Autora z zakresu przedmiotu rozprawy. Słabą stroną przedmiotowego przeglądu jest mały krytycyzm Autora w stosunku do cytowanych źródeł literatury.

Rozprawa zawiera wiele oryginalnych wyników Autora w dziedzinie metod półaktywnego modalnego sterowania mechanicznymi układami drgającymi oraz ich numerycznej i eksperymentalnej weryfikacji. Stanowi ona oryginalne zastosowanie znanych z literatury metod sterowania optymalnego oraz identyfikacji. Zaproponowana przez Autora metoda chwilowego sterowania optymalnego węzłami

blokowanymi określającą funkcję sterowania w zależności od zmiany energii stanowi oryginalną koncepcję, wynikającą z zarówno z podstaw teorii sterowania jak i z wymagań konstrukcyjnych realizacji sterowania w czasie rzeczywistym. Daje to możliwość zastosowania tej metody w praktyce przemysłowej w czasie rzeczywistym

Rozprawa ma przede wszystkim charakter pracy numerycznej i eksperymentalnej, w której główny nacisk położono na numeryczną i eksperymentalną weryfikację zaproponowanej metody sterowania pół-aktywnego obejmującej również optymalne rozmieszczenie sensorów czy odzyskiwanie energii. W implementowanych algorytmach numerycznych zawartych jest wiele oryginalnych idei Autora wynikających z jego obserwacji przeprowadzanych symulacji komputerowych. Ponadto Autor eksperymentalnie zweryfikował skuteczność proponowanej metody sterowania.

Numeryczny oraz eksperymentalny charakter rozprawy, badanie konstrukcji ramowych, wykorzystanie blokowanych węzłów łączących belki konstrukcji powoduje, że mieści się ona w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Oryginalne osiągnięcia Autora prezentowane w rozprawie obejmują:

- Zaproponowanie oryginalnej metody pół-aktywnego modalnego sterowania drganiami konstrukcji ramowej obejmującej:
 - Optymalną lokalizację sensorów (str. 75)
 - Chwilowo optymalne prawo sterowania blokowanyimi węzłami (str. 81),
- Numeryczne zweryfikowanie skuteczności zaproponowanych metod sterowania:
 - W tłumieniu drgań swobodnych, wymuszonych, przypadkowych konstrukcji ramowej (str. 93-114),
 - W odzyskiwaniu energii pochodzącej z drgań mechanicznych konstrukcji ramowej, zaprojektowanie i wykorzystanie urządzenia pozyskującego energię, wykazanie wyższej efektywności proponowanej metody względem metod z literatury (str. 117-135),
- Eksperymentalne zweryfikowanie skuteczności zaproponowanych metod sterowania obejmujące:
 - Kalibrację modelu numerycznego (str. 146-149), opracowanie sterownika (str. 150-154),
 - Omówienie wyników przeprowadzonych testów wskazujących na silne i słabe strony zaproponowanej metody tłumienia modalnego drgań konstrukcji ramowych (str. 160-162, 166-174, 178-180).

Autor prawidłowo i we właściwy sposób sformułował zagadnienie badawcze. Wykorzystując istniejące algorytmy i metody zaproponował on nową metodę sterowania modalnego pół-aktywnego układami drgającymi. Ponadto wykorzystał on nowoczesne narzędzia modelowania komputerowego uzyskując oryginalne wyniki numeryczne potwierdzające przydatność i efektywność zaproponowanej metody do tłumienia drgań układów mechanicznych. Autor wykazał się znajomością metod eksperymentalnych i na bazie wyników przeprowadzonych eksperymentów wskazał realne trudności we wdrożeniu zaproponowanych metod sterowania.

Przeprowadzona analiza teoretyczna oraz wykonane prace programistyczne i eksperymentalne a także uzyskane wyniki numeryczne i eksperymentalne pozwoliły Autorowi na udokumentowanie słuszności poczynionych założeń, udaną realizację założonych celów rozprawy i tym samym potwierdzenie oraz udowodnienie zdefiniowanej tezy rozprawy. Przedstawiona rozprawa posiada również walory aplikacyjne. Zaproponowana metoda może być wykorzystana w tłumieniu drgań budynków oraz innych konstrukcji ramowych. **Wykonana w ramach rozprawy praca jest istotnym wkładem w rozwój metod numerycznych i eksperymentalnych do pół-aktywnego modalnego sterowania drgającymi konstrukcjami ramowymi i zawiera oryginalne elementy.**

4. Ocena redakcyjna i językowa rozprawy

Układ treści rozprawy jest logiczny i prawidłowy oraz podporządkowany uzasadnieniu tezy rozprawy. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem angielskim. Tekst nie jest pozbawiony literówek bądź powtórzeń wyrazów (np. str. 46). Autor najczęściej w zrozumiały sposób formułuje problem badawczy, opisuje metodę jego rozwiązania oraz uzyskane wyniki numeryczne lub eksperymentalne. Większość pozycji literatury zawiera numer DOI lub ISBN. Zamieszczone tabele i rysunki są czytelne, starannie opisane w tekście i zrozumiałe. Znaczna część rysunków jest różnokolorowa, co tym bardziej ułatwia czytelnikowi ich analizowanie.

Do mankamentów redakcji rozprawy zaliczam brak spisu oznaczeń użytych w tekście. Ponadto Autor mógłby zredukować tekst rozprawy. Przykładem jest rozdział 2, w którym najpierw opisuje się konstrukcję z 2 stopniami swobody a następnie konstrukcję ogólną z wieloma stopniami swobody powtarzając wiele komentarzy. Podobna uwaga dotyczy pozostałych rozdziałów. Rozdział 6 stanowi raczej rozszerzone streszczenie rozprawy a nie jej Podsumowanie i najważniejsze wnioski płynące z badań. W rozprawie brakuje sekcji opisującej podstawowe fakty teorii sterowania modalnego wykorzystywane następnie w całej rozprawie.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Recenzowana praca obok wymienionych zalet ma również pewne słabe strony. Należą do nich między innymi:

Uwagi ogólne:

- 1) W spisie literatury Autor umieścił prace podające wyniki dotyczące stabilności, sterowalności, obserwowalności czy sterowania optymalnego liniowymi układami drgającymi. W rozprawie, mimo, że badane układy są biliniowe, wyniki te nie są ani cytowane ani wykorzystane?
- 2) W układach liniowych aby zapewnić ich sterowalność konieczne jest zapewnienie właściwych relacji pomiędzy ilością węzłów przeznaczonych na realizację funkcji sterowania i obserwacji. Czy w badanym układzie podobne relacje są zachowane?
- 3) Czy macierz sterowalności G zdefiniowana w wierszu 12 od dołu na str. 78 zapewnia sterowalność układu mechanicznego w sensie teorii sterowania? Macierz ta wydaje się być mapą binarną węzłów kandydujących do bycia węzłami blokowanymi? Czy ta macierz jest wyznaczana tylko raz czy musi być modyfikowana w każdej chwili czasu? W każdej iteracji? Czy warunki sterowalności nie lepiej byłoby sformułować z wykorzystaniem macierzy θ podanej we wzorze (3.27)?

Uwagi szczegółowe:

- 1) Str. 35 – równanie (2.1) jest określone dla $t > 0$? Czy jest możliwe aby konstrukcja podlegała drganiom nieskończenie długo? Chyba t należy do przedziału czasu $[0, T]$, gdzie $T > 0$ jest zadane?
- 2) Str. 42 – równanie (2.26) zawiera symbol Ω^2 . Co on oznacza?
- 3) Str. 51 – Rysunek 2.10: czy przedstawiona konstrukcja blokowanego węzła z pracy 145 jest oryginalnym wynikiem Autora?
- 4) Str. 55 – równanie (2.44) jest standardowym zapisem równania stanu w teorii sterowania optymalnego? W jakim celu Autor podał to równanie skoro w rozprawie nie korzysta dalej z tej postaci równania ani wyników z literatury dotyczących istnienia rozwiązań czy sterowalności?
- 5) Str. 63, wiersze 1-6 od góry – uzasadnienie, że energia W_m transferowana do m -tego modu jest

ujemna (?) jest niewystarczające. Z analizy pierwszego członu w (2.69) nie wynika jednoznacznie jego znak. Wektory m-ty i n-ty nie muszą mieć tego samego znaku? Wątpliwość pogłębiają formuły (2.70) i (2.71) – znak energii W_m może być dowolny. Ujemny znak energii E_m nie budzi wątpliwości.

- 6) Str. 69, wiersze 11-13 od dołu „FE mesh” – co oznacza, że siatka może być nie wystarczająco gęsta?
- 7) Str. 71, Rysunek 3.2 – czy to jest „wizja artystyczna” systemu sterowania czy realny inżynierski diagram? Gdzie jest wejście? Wyjście? Pętla sprzężenia zwrotnego?
- 8) Str. 75, zadanie 3.22 – czy wiadomo jak dobrze to zadanie aproksymuje zadanie oryginalne (3.17)?
- 9) Str. 79, wiersze 5-7 od góry - na Rysunku 3.2 nie ma odkształceń? Rysunek jest heurystyczny?
- 10) Str. 81, prawo sterowania (3.38) - z (3.33) wynika, że prawo sterowania zależy od funkcji Lapunowa. Przy zmianie sterowania z 1 na 0 system traci stabilność? Czy w obliczeniach numerycznych lub badaniach eksperymentalnych pojawiły się trudności ze stosowaniem tego prawa?
- 11) Str. 88, wzór (3.47) – ta energia może być i dodatnia i ujemna?
- 12) Str. 95, wiersz 1 od góry – raczej dwa sensory niż trzy?
- 13) Str. 98, Rys. 4.5a – przełączenia z 1 na 0 na dla $t < 0.5$ pojawiają się bardzo często i są krótkie? Jak to wpływa na stabilność konstrukcji ramowej?
- 14) Str. 117, sekcja 4.2.2 – czy konstrukcja i model urządzenia EMEH jest oryginalnym wynikiem Autora? Czy jest wzięty z literatury?
- 15) Str. 134, Tabela 4.8 – dlaczego wynik dla konfiguracji 1 jest dużo lepszy niż dla konfiguracji 2?
- 16) Str. 138, Rysunek 5.1 – czy z punktu widzenia sterowalności tego obiektu wszystkie węzły muszą być blokowane?
- 17) Str. 158, wiersze 18-19 od dołu - skąd jest to przekonanie? Skoro tego nie udowodniono w rozprawie to po co o tym pisać?
- 18) Str. 178, Rysunek 5.27 – te drgania są stabilne, tj. nie da się ich stłumić?

6. Podsumowanie

Powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne nie mają zasadniczego wpływu na moją bardzo pozytywną opinię o rozprawie. Autor poprawnie sformułował nietrywialny problem badawczy pół-aktywnego modalnego tłumienia drgań układu mechanicznego mający duże znaczenie praktyczne. Problem ten Autor samodzielnie i w oryginalny sposób rozwiązał stosując zaproponowaną przez siebie metodologię sterowania pół-aktywnego. Wykazał się bardzo dobrą znajomością metod półaktywnego tłumienia drgań, metod wyznaczania sterowania optymalnego, oraz nowoczesnych metod obliczeniowych i eksperymentalnych, jak również pomysłowością, systematycznością i dużą pracowitością w przygotowaniu oraz przeprowadzeniu znacznej liczby symulacji komputerowych i eksperymentów laboratoryjnych. Wykazuje cechy predysponujące go do pracy naukowej.

Uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy określone w art. 13 ust. 1 -2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku z późn. zm. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnioskuje o dopuszczenie Pana Mariusza Ostrowskiego do jej publicznej obrony celem uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

A. Myśliński
Andrzej Myśliński