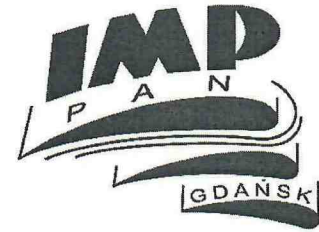


Gdańsk, 7.01.2025

Dr hab. inż. Paweł Kudela, prof. instytutu
Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszer 14
80-231 Gdańsk
email: pk@imp.gda.pl



**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr. inż. Mariusza Ostrowskiego
pt. „Semi-active control of energy transfer between vibration modes in
mechanical structures”**

Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo sekretarza rady naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki, Polskiej Akademii Nauk, Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego z dnia 13 grudnia 2024 r. wraz z załączoną rozprawą doktorską napisaną przez Pana mgr. inż. Mariusza Ostrowskiego w języku angielskim pt. „Semi-active control of energy transfer between vibration modes in mechanical structures”, jej streszczeniem w języku angielskim i polskim, Curriculum Vitae Pana mgr. inż. Mariusza Ostrowskiego, wykazem publikacji związanych z rozprawą doktorską oraz autoreferatem wykazującym uzyskanie kwalifikacji na poziomie ósmym Polskiej Ramy Kwalifikacji.

Praca doktorska została zrealizowana w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki, Polskiej Akademii Nauk w Zakładzie Technologii Inteligentnych pod opieką promotora dr. hab. inż. Bartłomieja Błachowskiego, prof. IPPT PAN oraz promotora pomocniczego dr. inż. Grzegorza Mikułowskiego.

Zasadność podjęcia tematu

Niniejsza rozprawa doktorska skupia się na nowej strategii pół-aktywnego sterowania modalnego, pozwalającego na precyzyjne przenoszenie energii pomiędzy poszczególnymi postaciami drgań konstrukcji mechanicznej. Strategię tą można zastosować do tłumienia drgań konstrukcji oraz odzyskiwania energii z drgań konstrukcji (z ang. *energy harvesting*). Zagadnienia te badane są od lat, ale nadal są aktualne i niezwykle ważne. W sprzęcie

inżynierskim drgania konstrukcji występują, gdy siły generowane przez maszyny powodują drgania konstrukcji. Może to prowadzić do awarii sprzętu, przenoszenia hałasu i stanowić zagrożenie bezpieczeństwa. Drgania sprzętu mechanicznego oraz konstrukcji budowlanych są szkodliwe dla ludzi. W większej skali, trzęsienia ziemi powodują ogrom zniszczeń i stanowią zagrożenie życia ludzkiego. Z drugiej strony, z uwagi na szeroko stosowane urządzenia bateryjne, urządzenia monitorujące i takie które nosimy na sobie (z ang. *wearables*) coraz więcej badań prowadzonych jest w kierunku odzyskiwania energii. Tym samym, proponowana tematyka badawcza wpisuje się w obecne trendy i wyzwania naukowe.

Proponowana w rozprawie doktorskiej strategia sterowania wykorzystuje blokowane węzły obrotowe do precyzyjnego przenoszenia energii mechanicznej między wybranymi postaciami drgań. W zależności od sygnałów sterujących takie połączenia mogą być blokowane i przenosić momenty zginające między sąsiadującymi elementami konstrukcyjnymi lub mogą być odblokowywane i działać jak zawias. Umożliwia to tłumienie drgań z narzuceniem priorytetu na poszczególne postacie drgań. Co więcej, priorytet można ustawić na postać drgań, z którą najlepiej współpracuje zamontowany do drgającej konstrukcji przetwornik elektromechaniczny, co zwiększa efektywność odzyskiwania energii drgań.

Algorytm sterowania oparty jest na oszacowaniu chwilowej wartości przepływu energii między postaciami drgań. Przepływ energii szacowany jest na podstawie prędkości modalnych oraz momentów zginających przenoszonych przez zablokowane węzły. Prędkości modalne monitorowanych postaci drgań estymowane są za pomocą filtracji modalnej. Natomiast momenty zginające szacowane są na podstawie pomiarów odkształceń wykonanych za pomocą tensometrów umieszczonych w pobliżu każdego blokowanego węzła.

Rozprawa doktorska obejmuje również inne aspekty strategii sterowania, takie jak optymalne rozmieszczenie czujników do filtracji modalnej oraz optymalne rozmieszczenie blokowanych połączeń. Zagadnienia te są interesujące i same w sobie stanowią duże wyzwanie.

Badania przedstawione w rozprawie doktorskiej motywowane są faktem, że istniejące strategie sterowania pół-aktywnego, których celem jest indukowanie transferu energii, są heurystyczne i zazwyczaj są w stanie przenosić energię tylko w kierunku wyższych częstotliwości drgań. Nie wykorzystują żadnego sprzężenia zwrotnego ze stanu wyrażonego w kategoriach parametrów modalnych. Ponadto, wiedza na temat wpływu efektu blokowania węzłów na sprzężenie modalne i transfer energii modalnej jest bardzo ograniczona. Dodatkową motywacją badań są widoczne w literaturze przedmiotu, zwłaszcza w ostatniej dekadzie, wysiłki poświęcone poprawie kompromisu między wydajnością szczytową a pasmem częstotliwości roboczych przetworników elektromechanicznych poprzez wprowadzanie celowych nieliniowości, badanie zjawisk rezonansu wewnętrznego i projektowanie urządzeń adaptacyjnych np. wykorzystujących metamateriały.

Doktorant postawił tezę (str. 27):

„Dynamic reconfiguration of frame structures by locking and unlocking rotational joints can be used for precise transfer of mechanical energy between selected vibration modes in a chosen direction. Such a reconfiguration is a generalization of the “Prestress Accumulation–Release” (PAR) strategy and, in addition to being used to mitigate vibrations, can increase the efficiency of energy harvesting when necessary.”

Cel i teza pracy zostały sformułowane poprawnie i precyzyjnie. Proponowany temat badawczy jest istotny z punktu widzenia poznawczego jak i aplikacyjnego. Doktorant poprzez skrupulatne

studia literaturowe umiejętnie znalazł lukę w wiedzy, którą należy uzupełnić. Ten fakt należy docenić, z uwagi na ogrom publikacji w temacie tłumienia drgań i odzyskiwania energii.

Zakres i treść rozprawy

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim i liczy 185 stron netto. Rozprawa doktorska obejmuje również rozszerzone streszczenie napisane w języku polskim (6 stron), które w sposób syntetyczny przedstawia podjęty problem badawczy, metodykę jego rozwiązania i konkluzje.

Rozprawa doktorska została podzielona na sześć rozdziałów.

Rozdział 1 wprowadza czytelnika w problematykę z zakresu kontroli drgań i odzyskiwania energii wynikających z drgań konstrukcji. Doktorant przytacza liczne odwołania do literatury, dyskutuje wady i zalety metod pasywnych i aktywnych sterowania drganiami jak również metody pół-aktywnej, która stanowi kompromis pomiędzy tłumieniem pasywnym a sterowaniem aktywnym. Doktorant poświęca specjalną uwagę pół-aktywnej metodzie sterowania w zastosowaniach do łagodzenia drgań konstrukcji lekkich, takich jak maszyny telekomunikacyjne czy podatne kratownicowe konstrukcje przestrzenne wyposażone w aparaturę pomiarową. Wśród wymienianych wielu strategii sterowania, z badań literaturowych wynika, że, jedna z nich bazująca na akumulowaniu i uwalnianiu nagromadzonej energii odkształceń, a mianowicie „prestress accumulation-release” (PAR) jest efektywna, aczkolwiek nie pozbawiona wad. Motywuje to do rozwinięcia tej strategii w postaci pół-aktywnego sterowania modalnego.

Rozdział 2 opisuje wpływ blokowania węzła na dynamikę konstrukcji, przy czym uwaga została skupiona na ramach płaskich. Zablockowanie/odblokowanie węzła traktowane jest jako swego rodzaju rekonfiguracja skutkująca usunięciem/przywróceniem więzów kinematycznych. Omówione zostały kolejno przykłady układów rekonfigurowalnych o dwóch stopniach swobody oraz wielu stopniach swobody. Opisano efekty sprzężenia modalnego i przeniesienia energii modalnej wynikające z blokowania węzłów. Zaproponowano nowy model matematyczny, w którym wprowadzono relaksację kinematyki za pomocą wiskotycznego modelu węzła z dużym współczynnikiem tłumienia.

Rozdział 3 porusza różne aspekty strategii kontroli drgań takie jak wielkości pomiarowe, które powinny być uwzględnione, optymalne rozmieszczenie czujników oraz potencjalne zastosowania proponowanej metody pół-aktywnej do tłumienia drgań jak i odzyskiwania energii.

Rozdział 4 poświęcony został obliczeniom numerycznym, w których Doktorant weryfikuje zaproponowaną metodę pod kątem skuteczności tłumienia drgań i odzyskiwania energii. Przeanalizowano kilka rodzajów wymuszeń i dokonano porównania z metodą PAR.

Rozdział 5 zawiera opis badań eksperymentalnych na laboratoryjnym demonstratorze. Badano zarówno zdolność do tłumienia drgań jak i przenoszenia drgań do wstępnie wybranej postaci drgań. Analizowano zarówno drgania swobodne jak i wymuszone. Wyniki eksperymentalne (częstotliwości i postacie drgań) posłużyły do aktualizacji modelu sterowanej konstrukcji bazującego na metodzie elementów skończonych. Następnie model został wykorzystany do obliczania parametrów używanych w algorytmie sterowania, a także do przeprowadzania symulacji numerycznych mających na celu porównanie wyników

numerycznych z wynikami eksperymentalnymi. W przeprowadzonych analizach zwrócono uwagę na imperfekcje prototypów blokowanych połączeń stosowanych w testach.

W rozdziale 6 zamieszczono wnioski dotyczące proponowanej metodologii, jej weryfikacji numerycznej i walidacji eksperymentalnej. Ogólnie można stwierdzić, że zaproponowana metoda jest skuteczna. Wskazano również nierozwiązane problemy i perspektywy przyszłych badań.

Integralną częścią rozprawy doktorskiej jest załącznik A, w którym zaprezentowano trójwymiarowe postacie drgań ramy badanej eksperymentalnie.

Układ rozprawy doktorskiej jest poprawny i nie budzi zastrzeżeń. Na uwagę zasługuje obszerna bibliografia składająca się ze 165 pozycji, które zostały starannie dobrane. Doktorant odwołuje się zarówno do uznanych, historycznie ważnych publikacji z zakresu dynamiki konstrukcji oraz sterowania jak również do opatentowanych rozwiązań tłumienia drgań. Ponadto wiele pozycji literaturowych to publikacje z ostatniej dekady, co świadczy o tym, że poruszane w rozprawie zagadnienia są ważne i ciągle rozwijane, a Doktorant śledzi aktualne trendy.

Ocena strony redakcyjnej

Skład rozprawy jest estetyczny, rysunki mają jednolity charakter, wzory matematyczne i algorytmy zostały przygotowane w sposób czytelny, niemniej jednak z uwagi na dość dużą liczbę symboli, korzystne byłoby umieszczenie ich spisu na początku rozprawy doktorskiej. Język rozprawy jest poprawny, występują jedynie nieliczne błędy, głównie interpunkcyjne i literowe, co sprawia, że rozprawę dobrze się czyta. Doktorant w sposób przejrzysty przedstawia omawiane zagadnienia. Rozprawa doktorska ma bardzo dobrze przemyślany układ z logicznym podziałem na rozdziały, podrozdziały oraz wyróżnione podsekcje tam, gdzie jest to konieczne. Całość wygląda bardzo schludnie i może stanowić wzorcowy przykład składu rozprawy doktorskiej.

Moje propozycje korekty edycyjnych znajdują się w załączniku nr 1.

Merytoryczna ocena rozprawy

Przedstawione w rozprawie doktorskiej badania naukowe mają charakter multidyscyplinarny. Główny obszar naukowy to szeroko pojęta dynamika konstrukcji, która w szczególności obejmuje elementy sterowania. Doktorant, żeby zrealizować postawione cele musiał wykazać się również znajomością metody elementów skończonych, metod optymalizacji oraz automatyki pomiarowej.

Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania teoretyczne są oryginalne, poddane skrupulatnej weryfikacji numerycznej i eksperymentalnej.

Doktorant zauważył, że aby sterować konstrukcją wystarczy opisać jej ruch w bazie wektorów własnych uzyskanej dla wszystkich węzłów w stanie odblokowanym. Jest to możliwe ze względu na największy i wystarczający wymiar tej bazy. Konieczne było natomiast uwzględnienie efektu sprzężenia modalnego w modalnych równaniach ruchu opisanych w tej bazie, aby prawidłowo odwzorować efekt zablokowania i jego wpływ na zachowanie konstrukcji. Sprzężenie modalne pozwala również opisać wymianę energii między postaciami drgań. Komplet równań ruchu doktorant wyprowadził dla rekonfigurowalnego układu o dwóch

stopniach swobody po czym zaproponował nową metodę z rozluźnionymi ograniczeniami kinematycznymi z lepkiem modelem połączenia. W tym przypadku więzy realizowane są za pomocą sterowanego współczynnika tłumienia wiskotycznego między obrotowymi stopniami swobody opisującymi blokowane więzy. Wyprowadzenie równań ruchu zostało następnie rozszerzone do przypadku konstrukcji o wielu stopniach swobody. Wyprowadzenie to nie budzi zastrzeżeń.

Tok rozumowania jest przejrzysty, Doktorant wyciąga prawidłowe wnioski, poparte inżynierskim doświadczeniem. Przykładowo na str. 149 prawidłowo stwierdza, że moduł Younga materiału z którego została wykonana belka obarczony jest mniejszą niepewnością niż sztywność połączenia śrubowego. Zaproponowane rozwiązanie sterowania pół-aktywnego zostało porównane z metodą PAR. Doktorant wykazał, że jest ono skuteczne i wymaga mniejszej liczby przełączy węzłów do zredukowania drgań konstrukcji (pod względem poziomu przemieszczeń i średniej energii).

Dużą wartość rozprawy doktorskiej stanowi część eksperymentalna. Pozwoliła ona zarówno zaktualizować modele jak i zwalidować strategię sterowania zarówno pod względem tłumienia drgań jak i odzyskiwania energii. W obu przypadkach strategia ta spełniła założenia i oczekiwania, aczkolwiek efektywność okazała się nie tak wysoka jak w przypadku obliczeń numerycznych. W tym miejscu Doktorant zwraca uwagę na imperfekcje prototypowych połączeń stosowanych w stanowisku laboratoryjnym i suche tarcie rezydujące obecne w połączeniu obrotowym mimo odblokowanego węzła. Wnioski z przeprowadzonych badań numerycznych i eksperymentalnych są bardzo cenne i pomogą w dalszym usprawnianiu opracowanego układu i jego sterowania.

Do oryginalnych elementów rozprawy doktorskiej należy zaliczyć:

- szczegółową analizę teoretyczną wpływu blokowania węzłów na sprzężenie modalne i transfer energii modalnej; badania te mają bezpośrednie zastosowanie w opracowywaniu strategii sterowania i oprogramowania sterownika;
- opracowanie metod optymalnego rozmieszczenia czujników służących do przeprowadzenia filtrowania modalnego i sterowania zachowania konstrukcji przez blokowanie i odblokowywanie węzłów;
- opracowanie sposobu sterowania, które jest bezpośrednio oparte na teoretycznej analizie i algorytmie sterowania, który dodatkowo uwzględnia ograniczenia sprzętowe i inne kwestie praktyczne takie jak brak możliwości umieszczenia czujników w niektórych miejscach na konstrukcji. Algorytm sterowania natychmiast maksymalizuje ważoną szybkość transferu między poszczególnymi monitorowanymi postaciami drgań konstrukcji. Algorytm umożliwia również nałożenie priorytetu na wybraną docelową postać drgań.

Rozprawa doktorska jest kompletna, zawiera wszystkie składniki składające się na bardzo dobrą rozprawę doktorską. Doktorant przeprowadził obszerne badania literaturowe, które pozwoliły mu znaleźć lukę w wiedzy. Luka ta została wypełniona przez opracowanie modeli matematycznych o solidnych podstawach fizycznych, następnej ich weryfikacji i walidacji eksperymentalnej.

Moim zdaniem doktorant w pełni zrealizował postawione w rozprawie doktorskiej cele i udowodnił postawioną tezę.

Pytania i uwagi dyskusyjne

Zasadniczo, rozprawa doktorska nie zawiera uchybień i nie mam uwag krytycznych. Natomiast poniżej zamieszczam punkty, które warto byłoby poddać dyskusji.

- 1) Streszczenie, str. xi: „Algorytm sterowania zaimplementowano na sterowniku FPGA. Z uwagi na jego ograniczoną pamięć możliwe było sterowanie jedną parą węzłów na raz – pozostałe były w tym czasie pasywnie zablokowane.” Czy nie można było zastosować większej liczby sterowników FPGA? Czy w przyszłości planowana jest rozbudowa stanowiska badawczego z indywidualnym sterowaniem wielu par węzłów? Czy można spodziewać się zwiększenia efektywności tłumienia drgań w takim przypadku? Jakie są wyzwania związane z taką implementacją?
- 2) We wprowadzeniu Doktorant posługuje się pojęciem „sztywność ujemna” często wykorzystywanym w badaniach nad metamateriałami oraz izolatorami drgań, natomiast nie wyjaśnia tego pojęcia. Korzystne byłoby wyjaśnienie tego pojęcia.
- 3) We wprowadzeniu Doktorant w kilku miejscach wspomina o trzęsieniach ziemi, falach sejsmicznych i wzbudzonych w ten sposób drganiach konstrukcji natomiast nie odnosi się do możliwości ich pasywnego tłumienia za pomocą metamateriałów.
- 4) Str. 94; Dlaczego w metodzie elementów skończonych w modelowaniu konstrukcji ośmionawowej zastosowano teorię belek Eulera-Bernoulliego a nie inną teorię jak np. Timoshenko? Zakładam, że w zakresie analizowanych częstotliwości teoria Eulera-Bernoulliego jest wystarczająco dokładna, ale nigdzie w rozprawie nie ma informacji na ten temat, ani informacji co do przeprowadzonych testów zbieżności. Opis modelu również wymagałby dalszych wyjaśnień, ponieważ jeśli przyjmiemy konwencję przyjętą do opisu stopni swobody w belkowym elemencie skończonym przy założeniu sześciennych funkcji kształtu, co odpowiada 4 węzłom na element, całkowita liczba stopni swobody w modelu byłaby znacznie większa niż podane 26 stopni swobody. Podobny problem występuje na stronie 116.
- 5) Suche tarcie w prototypowych rekonfigurowalnych węzłach wydaje się być dość problematyczne zarówno z uwagi na zużycie materiału jak i zmniejszenie efektywności tłumienia. Czy Doktorant ma jakieś pomysły na ulepszenie rozwiązania technicznego, które zredukowałoby lub wyeliminowało ten problem?
- 6) Z uwagi na heurystyczny charakter zjawisk występujących podczas blokowania i odblokowywania węzłów drgających konstrukcji, wydaje się, że interesującą metodą sterowania byłaby metoda bazująca na uczeniu wzmocnionym. Doktorant wspomina we wprowadzeniu neuro-kontroler zaproponowany przez Błachowskiego i Pnevmatikosa (poz. bibliograf. [65]), natomiast nie podaje przykładu kontrolera bazującego na uczeniu wzmocnionym. Ciekaw jestem opinii Doktoranta na temat perspektyw przyszłych badań z wykorzystaniem uczenia wzmocnionego. Jednocześnie wyobrażam sobie, że może to być temat na kolejną rozprawę doktorską.
- 7) Na ile kłopotliwe jest dobranie wartości progowej k danej wzorem (4.1)?
- 8) W badaniach numerycznych doktorant porównał opracowaną metodę z metodą PAR. Czy podobne testy zostały przeprowadzone na stanowisku eksperymentalnym? Czy można wysnuć podobne wnioski jak w badaniach numerycznych?
- 9) W przykładach eksperymentalnych odzyskiwania energii występuje niepożądany efekt zwiększenia gęstości energii spektralnej w wyższych częstotliwościach (Rys. 5.26 i Rys. 5.29). Doktorant wspomina, że efekt ten można zredukować poprzez

zastosowanie ujemnej wagi do docelowej postaci drgań. Jak należy to rozumieć, skoro w analizowanych przypadkach jedna z wag już była wybrana jako ujemna?

Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mariusza Ostrowskiego dotyczy aktualnego i oryginalnego tematu z obszaru dynamiki konstrukcji. Zagadnienia tłumienia drgań będące przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej są niezwykle ważne z punktu widzenia konieczności ochrony konstrukcji przed uszkodzeniami jak i zapobieganiem szkodliwego wpływu drgań na zdrowie człowieka. Ponadto opracowane przez doktoranta modele można wykorzystać do poprawy efektywności odzyskiwania energii drgań. Jest to możliwe poprzez selektywne, ukierunkowane przeniesienie energii do wybranej, odblokowanej postaci drgań, dla której przetwornik elektromechaniczny zamontowany do drgającej konstrukcji pracuje optymalnie.

Dysertacja przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i jest potwierdzeniem umiejętności doktoranta w samodzielnym prowadzeniu badań naukowych na wysokim poziomie. Z formalnego punktu widzenia stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim wynikające z art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z późn. zm. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony Jego rozprawy doktorskiej i dalsze procedowanie w sprawie nadania stopnia doktora.

Ponadto, jeśli Doktorant spełnia kryteria IPPT PAN, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej z uwagi na:

- bardzo wysoki poziom naukowy rozprawy doktorskiej,
- umiejętność wypełnienia luki wiedzy w bardzo popularnym obszarze naukowym,
- wiele elementów oryginalnych rozprawy doktorskiej,
- ponadprzeciętny dorobek naukowy Doktoranta, na który składa się trzynaście artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach o wysokim współczynniku wpływu (w ośmiu z nich mgr inż. Mariusz Ostrowski jest pierwszym autorem), 23 prace związane z konferencjami naukowymi o zasięgu międzynarodowym oraz jeden rozdział w monografii.



Paweł Kudela