

dr hab. inż. Igor Maciejewski, prof. uczelni  
Katedra Mechatroniki i Automatyki  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Koszalińska

Koszalin, 17 sierpnia 2021

**Recenzja pracy doktorskiej  
mgr. inż. Błażeja Popławskiego pt.**

**„SEMI-ACTIVE MITIGATION OF VIBRATIONS  
IN FRAME STRUCTURES BY USING STRUCTURAL JOINTS  
WITH A CONTROLLABLE ABILITY TO TRANSMIT MOMENTS”**

wykonana na zlecenie Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN

Promotor: dr hab. inż. Łukasz Jankowski, prof. IPPT PAN

**Tematyka pracy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Błażeja Popławskiego poświęcona jest zagadnieniom półaktywnego tłumienia drgań mechanicznych w wiotkich (ang. slender), dwuwymiarowych konstrukcjach ramowych, a jej celem jest opracowanie oryginalnej strategii sterowania drganiami układu poprzez zmianę charakterystyki pracy jego połączeń konstrukcyjnych (węzłów). Zaproponowana strategia sterowania umożliwi konwersję zakumulowanej w układzie energii potencjalnej na energię kinetyczną drgań odpowiadających wysokim częstościom własnym, a następnie jej rozproszenie wskutek zwiększonego tłumienia materiałowego występującego w układzie.

Tematyka opiniowanej pracy jest aktualna, ważna ze względów praktycznych i interesująca ze względów naukowych, ponieważ w istniejącej literaturze brakuje usystematyzowanej wiedzy na temat procedur postępowania przy projektowaniu półaktywnych układów tłumienia drgań, opartych na dynamicznej rekonfiguracji topologii sterowanej konstrukcji. Brakuje jednocześnie efektywnych procedur formułowania i rozwiązywania zadania optymalizacji, wspomagającego proces syntezy systemu sterowania, szczególnie dla rozbudowanych konstrukcji ramowych.

## Zakres pracy

Opiniowana praca doktorska składa się z 6 rozdziałów napisanych poprawnie w języku angielskim, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografii zawierającej 245 pozycji literaturowych.

W rozdziale pierwszym przedstawiono analizę literatury dotyczącą obecnie stosowanych układów tłumienia drgań mechanicznych, podając genezę i uzasadnienie podjęcia tematu pracy. Autor dość ogólnie omówił metody pasywnego oraz aktywnego tłumienia drgań w odniesieniu do konstrukcji mechanicznych, a swoją uwagę skupił wokół metod półaktywnych w zastosowaniu do sterowania drganiami wiotkich konstrukcji ramowych. Jednak słusznie wskazuje na niedostatek metod wspomagających proces rozmieszczania elementów wykonawczych w taki sposób, aby zwiększyć efektywność tłumienia drgań konstrukcji względem wybranego kryterium oceny. Również w tym rozdziale pracy przedstawiono jej zakres oraz etapy badań służące do realizacji postawionego celu naukowego, którym jest opracowanie półaktywnego systemu sterowania drganiami układu w sposób dwustanowy.

Rozdział drugi poświęcono teoretycznym aspektom syntezy systemu sterowania, gdzie cechy charakterystyczne sterowania globalnie optymalnego wyprowadzono z wykorzystaniem zasady maksimum Pontriagina. Doprowadziło to do zaproponowania oryginalnego algorytmu sterowania drganiami konstrukcji ramowych w dwóch odmiennych wariantach, tj. przy użyciu strategii scentralizowanej (globalnej) oraz zdecentralizowanej (lokalnej). Autor trafnie opisuje zalety stosowania strategii zdecentralizowanej w praktyce, która wykorzystuje energię potencjalną tylko wybranych elementów konstrukcji jako sprzężenie zwrotne w procesie sterowania półaktywnego.

W trzecim rozdziale recenzowanej pracy Autor przeprowadził numeryczną weryfikację zaproponowanej strategii sterowania dla ściśle określonych warunków ruchu układu, tj. w przypadku wykonywania przez układ drgań swobodnych oraz przy ich wymuszeniu siłą harmoniczną i losową. Wyniki analiz numerycznych uzyskane dla innowacyjnego układu półaktywnego zestawiono z wynikami w przypadku pasywnej konfiguracji, w której zamiast elementów sterowanych zastosowano tłumiki wiskotyczne o optymalnej (według określonego kryterium) charakterystyce tłumienia. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych stwierdzono jednoznacznie, że zaproponowana strategia sterowania zwiększa efektywność tłumienia drgań wiotkich konstrukcji ramowych.

Rozdział czwarty poświęcono badaniom weryfikującym poprawność oraz skuteczność działania konkretnego rozwiązania technicznego układu w warunkach

laboratoryjnych. Porównano właściwości dynamiczne układu sterowanego dwustanowo w wybranych węzłach badanej konstrukcji z jej pasywnym odpowiednikiem. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają przydatność zaproponowanej przez Autora strategii sterowania do tłumienia drgań dwuwymiarowych struktur ramowych.

W rozdziale piątym sformułowano uniwersalny wskaźnik jakości, który wspomaga proces rozmieszczania elementów wykonawczych tylko w niektórych węzłach konstrukcji ramowej. Klasyfikuje on bowiem układ węzłów pod względem wielkości zakumulowanej energii potencjalnej, która kolejno może zostać rozproszona przy wykorzystaniu rekomendowanego przez Autora algorytmu sterowania drganiami. Przydatność zaproponowanego wskaźnika w procesie projektowania układu półaktywnego została w pełni potwierdzona poprzez wykonanie szeregu czasochłonnych symulacji komputerowych.

W szóstym rozdziale pracy Autor formułuje wnioski końcowe dotyczące opracowanej strategii sterowania w zastosowaniu do ograniczania drgań płaskich konstrukcji ramowych. Określa ponadto nowe kierunki wynikające z możliwości rozwinięcia prowadzonych badań, co jest szczególnie ważne przy ocenie pracy jako rozprawy doktorskiej.

### **Najważniejsze rezultaty naukowe**

Na podstawie analizy treści pracy można stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze i użyteczne. Do oryginalnych i z naukowego punktu widzenia wartościowych osiągnięć Autora zaliczyć należy:

1. Zaproponowanie nowatorskiej strategii dwustanowego sterowania drganiami smukłych konstrukcji ramowych, która rozwiązuje problem optymalnego czasu przełączania sterowalnych węzłów układu w oparciu o zasadę maksimum Pontriagina.
2. Opracowanie efektywnego obliczeniowo modelu MES dla sterowalnego węzła układu oraz przeprowadzenie analizy numerycznej w celu potwierdzenia poprawności działania modelu.
3. Przeprowadzenie badań symulacyjnych wybranej konstrukcji ramowej, której amplitudy drgań ograniczono przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu sterowania półaktywnego.

4. Weryfikacja eksperymentalna zaproponowanej strategii sterowania z wykorzystaniem dedykowanego stanowiska laboratoryjnego, na którym rejestrowano zarówno drgania swobodne badanej konstrukcji ramowej, jak i wymuszone siłą harmoniczną oraz losową.
5. Zdefiniowanie autorskiego wskaźnika jakości na potrzeby doboru elementów wykonawczych do specyficznej topologii układu wieloczołowego oraz numeryczne wykazanie jego przydatności w przypadku rozbudowanej konstrukcji ramowej.

Rozprawę doktorską mgr. inż. Błażeja Popławskiego oceniam wysoko. Wykorzystano w niej i twórczo rozwinięto metody półaktywnego tłumienia drgań mechanicznych w odniesieniu do wiotkich konstrukcji ramowych. W tym zakresie rozprawa stanowi istotny i znaczący wkład w rozwój strategii sterowania drganiami z wykorzystaniem aktuatorów piezoelektrycznych. Najważniejsze wyniki pracy zaprezentowano w postaci artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach oraz referatów wygłoszonych na międzynarodowych konferencjach.

### **Uwagi krytyczne**

1. Przedstawiona metoda identyfikacji parametrów modelu w przypadku badanej konstrukcji ramowej polega na dopasowaniu wyników obliczeń numerycznych do wyników pomiarów przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Jednak w opiniowanej pracy nie zaprezentowano chociażby przykładowej procedury postępowania przy poszukiwaniu nieznanymi parametrów modelu oraz nie uściślono warunków wymuszenia ruchu układu. W związku z powyższym nie wiadomo, jaki jest zakres stosowalności zidentyfikowanych parametrów modelu obliczeniowego.
2. W pracy wykorzystano aktulatory piezoelektryczne jako elementy wykonawcze w półaktywnym układzie sterowania drganiami konstrukcji ramowej. Niestety nie przedstawiono zarówno modelu, jak i charakterystyk opisujących właściwości dynamiczne użytego napędu piezoelektrycznego. W szczególności nie określono szybkości narastania siły reakcji elementu wykonawczego po zmianie wartości sygnału sterującego ze stanu niskiego na stan wysoki.
3. Przeprowadzona przez Autora weryfikacja zaproponowanej strategii sterowania bazuje przede wszystkim na wynikach obliczeń numerycznych modelu. Wprawdzie wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowane w czwartym rozdziale niniejszej pracy wskazują na zwiększoną skuteczność

działania układu półaktywnego, jednakże nie zostały one porównane z wynikami uzyskanymi na drodze symulacji komputerowej. Takie zestawienie wyników mogłoby potwierdzić poprawność przyjętych założeń i uproszczeń w procesie modelowania obiektu badań.

4. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych w przypadku półaktywnego rozwiązania konstrukcji ramowej wykazują pożądane ograniczanie amplitud drgań w zakresie niższych częstotliwości (poniżej 80 Hz), tj. odpowiadających pierwszej i drugiej częstotliwości drgań własnych układu pasywnego. Jednak przy wyższych częstotliwościach obserwuje się zwiększone amplitudy drgań układu półaktywnego w porównaniu z jego pasywnym odpowiednikiem. Wobec tego, czy zaproponowany system sterowania generuje dodatkowe drgania w układzie przy wyższych częstotliwościach ruchu?

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wartości naukowej pracy i nie wpływają na wniosek końcowy.

### **Wniosek końcowy**

Recenzowana praca zawiera rozwiązanie istotnego z technicznego punktu widzenia zadania naukowego. Zastosowano właściwe metody naukowe, a uzyskane rozwiązania są przydatne dla praktyki. W świetle kryteriów obowiązującej Ustawy należy uznać zarówno przedkładaną pracę, jak i dorobek mgr. inż. Błażeja Popławskiego za wystarczający do przeprowadzenia publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN.

*Ygor Maniejski*