

Gliwice, 3 września 2024 r.

## Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Romualda Kurasa**

**pt. Optymalizacja kształtu aktuatora piezoelektrycznego  
w aktywnej redukcji drgań struktur dwuwymiarowych**

**Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych**

**Dyscyplina inżynieria mechaniczna**

### 1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Drgania mechaniczne są powszechnie spotykane w kontekście wielu konstrukcji, maszyn czy pojazdów. Często są one jednak zjawiskiem niepożądanym. Mogą być źródłem emisji akustycznej, która w zależności od natężenia generowanego hałasu, może powodować dyskomfort, utrudniać komunikację, czy nawet stanowić zagrożenia dla zdrowia człowieka. Same wibracje, w przypadku dużej intensywności lub długotrwałej ekspozycji, również mogą być niebezpieczne dla zdrowia ludzkiego. Wiele chorób zawodowych jest właśnie ich konsekwencją. Drgania niosą również zagrożenie dla samej struktury lub urządzenia, powodując szybsze zużycie komponentów, awarie lub obniżając funkcjonalność. Dlatego zagadnienie redukcji drgań jest problemem ważnym, aktualnym i często podejmowanym w środowisku naukowym i w przemyśle.

Recenzowana rozprawa koncentruje się na aktywnych metodach redukcji drgań, które wykorzystują dodatkowe elementy wykonawcze (aktuatory) bezpośrednio wpływające na drgania struktury. Jest to grupa metod, które znajdują zastosowanie najczęściej wtedy, kiedy klasyczne rozwiązania pasywne nie umożliwiają wystarczającej redukcji drgań. Celem pracy było poszukiwanie optymalnego kształtu aktuatora piezoelektrycznego zastosowanego w aktywnej redukcji drgań struktur dwuwymiarowych.

**Politechnika Śląska**  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania

ul. Akademicka 16, pok. 307, 44-100 Gliwice  
+48 32 237 23 98  
[Stanislaw.Wrona@polsl.pl](mailto:Stanislaw.Wrona@polsl.pl)  
NIP 631 020 07 36  
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

W opiniowanej pracy rozpatrywano redukcję drgań belki oraz drgań płyty trójkątnej. W obu przypadkach badano potencjalne korzyści, jakie może dać zastosowanie asymetrycznych kształtów aktuatorów piezoelektrycznych względem powszechnie dostępnych aktuatorów o regularnych kształtach, np. kołowym lub kwadratowym.

Powyższe spostrzeżenia pozwalają stwierdzić, że tematyka jaką wybrał Doktorant jest uzasadniona i mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

## 2. Zawartość i wyniki rozprawy

Poszczególne rozdziały ułożone są w logicznej kolejności. Zawartość rozprawy została ujęta w pięciu rozdziałach na 100 stronach, nie uwzględniając dodatków. Otwierają ją streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spis treści, a zamyka wykaz 97 pozycji literaturowych, z których w czterech Doktorant jest współautorem. Do pracy dołączono dodatek w formie trzech załączników. Rozprawa ilustrowana jest wieloma rysunkami, wykonanymi czytelnie, choć wartość merytoryczna lub interpretacja niektórych z nich budzi poważne wątpliwości, co zostało szczegółowo opisane w dalszej części recenzji. Treść pracy we właściwy sposób odpowiada jej tytułowi, a nazwy rozdziałów reprezentują adekwatnie prezentowaną w nich treść. Wykaz oznaczeń zawiera niestety tylko najważniejsze wielkości. Pełny wykaz niejednokrotnie ułatwiłby interpretację przedstawianych modeli matematycznych.

Rozdział pierwszy zawiera usystematyzowane wprowadzenie do prezentowanych zagadnień dotyczących metod redukcji drgań. Autor dokonuje przeglądu literatury dotyczącej tematu pracy i ocenia stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy. W świetle analizy światowej literatury zagadnienia uważam, że opracowanie mgr. inż. Romualda Kurasa jest oryginalne, choć wartość wnoszona w nurt badań nad redukcją drgań nie jest oczywista. Autor formułuje podstawowy cel naukowy pracy, którym jest „znalezienie kształtu PZT i jego położenia na trójkątnej płycie”. W świetle jasno sformułowanego celu pracy dotyczącego płyty trójkątnej, oraz odwołania się w tytule pracy do struktur dwuwymiarowych, zwraca uwagę fakt poświęcenia bardzo dużej części pracy drganiom belki, którym poświęcony jest rozdział drugi.

W rozdziale drugim Autor rozpatruje układ składający się z belki wraz z dodatkową masą punktową, wprowadzającą niejednorodność struktury i w konsekwencji asymetryczne postacie drgań belki. Jest to istotny warunek, aby asymetryczny kształt aktuatora piezoelektrycznego mógł przynieść korzyści względem regularnego aktuatora. Wyprowadzony został model układu z aktuatorem piezoelektrycznym symetrycznym i asymetrycznym. Część modelu dotycząca belki i samego elementu piezoelektrycznego nie budzi wątpliwości. Zastanawiają jednak założenia dotyczące elementu asymetrycznego. Czy realistyczne jest założenie, że możliwe jest swobodne regulowanie rozkładu par sił odpowiadających momentom gnącym? Czy możliwe będzie zachowanie całościowej efektywności aktuatora, jeśli jego asymetria będzie wiązała się z okrojonym kształtem, względem wyjściowego aktuatora symetrycznego? Należy wziąć pod uwagę, że spadek efektywności może całkowicie zniweczyć ewentualne korzyści płynące z lepszego dopasowania do niesymetrycznych drgań belki. Niestety nie zostały wykonane żadne badania eksperymentalne, które potwierdziłyby zasadność symulacji przeprowadzonych dla belki.

Porównanie redukcji drgań z regulatorem LQR dla aktuatorów symetrycznego i asymetrycznego w Sekcji 2.5.2 jednoznacznie pokazują brak istotnych różnic w ich działaniu. Potwierdzają to wykresy widoczne na Rys. 2.19-2.24 oraz Tabela 2.4. Powiększanie fragmentów wykresów (w dodatku z pominięciem opisu wartości osi pionowej) nie może stanowić o przewadze żadnego z badanych kształtów aktuatorów. Stąd wniosek o przewadze aktuatora asymetrycznego uważam za niepotwierdzony wynikami badań. Oddzielną kwestią jest prezentowanie wielu wykresów w dziedzinie częstotliwości dla jedynie tonalnego pobudzenia układu. Takie wykresy prezentują jedynie zjawisko wycieku widma, a porównanie efektów redukcji możliwe jest wyłącznie na podstawie kolorów nakładających się pików, co jest problematyczne.

Zwraca również uwagę fakt wykorzystania przez Doktoranta wbudowanej w środowisku MATLAB funkcji *lqr* do realizacji sterowania. Funkcje tak wysokiego poziomu mogą realizować nieco inne operacje od oczekiwanych i w pracach naukowych warto tego typu algorytmy implementować samodzielnie dla lepszej kontroli nad symulowanym układem.

W rozdziale trzecim Autor rozpatruje płytę trójkątną, dla której uogólnia zaproponowaną wcześniej dla belki koncepcję aktuatora asymetrycznego. Wyprowadzone równania modelu matematycznego co do zasady nie budzą wątpliwości. Wyniki symulacji prezentujące postacie drgań płyty wyglądają poprawnie. Nieoczywiste jest jednak czy sposób opisu matematycznego aktuatora asymetrycznego odpowiada rzeczywistości. Wyniki eksperymentalne przedstawione w kolejnym rozdziale nie pozwalają tego stwierdzić - charakterystyki częstotliwościowe widoczne np. na Rys. 4.13 dla aktuatora kwadratowego i asymetrycznego są niemal identyczne. Niestety podważa to wartość opisanych w rozdziale trzecim symulacji.

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych pokazują bardzo dobre efekty redukcji drgań dla wszystkich trzech kształtów aktuatorów - kwadratowego, okrągłego i asymetrycznego. Z wyjątkiem modu czwartego, dla pierwszych sześciu modów płyty, aktuator o asymetrycznym kształcie zapewnia pewną przewagę nad aktuatorami o innych kształtach. Pojawia się jednak pytanie czy zawsze możemy założyć pobudzenie układu wyłącznie jedną stałą częstotliwością? Rozpatrywanie pierwszych sześciu modów wskazuje na zainteresowanie Autora szerszym pasmem częstotliwości, jednak raz naklejony aktuator dedykowany na mody pierwszej, niekoniecznie będzie efektywny dla mody drugiej lub trzeciej. Nie można też go łatwo przenieść, czy to ręcznie lub tym bardziej automatycznie. Kształt aktuatora też jest inny podczas optymalizacji dla poszczególnych modów. Zatem czy w praktycznym zastosowaniu dla większej liczby modów nie powinien być rozpatrywany układ z kilkoma aktuatorami? Czy różnice w kształcie aktuatorów nadal miałyby wtedy znaczenie?

W rozdziale czwartym przedstawiono eksperymentalną weryfikację otrzymanych kształtów aktuatorów dla płyty trójkątnej. Wykonanie tych badań wiązało się na pewno z niemałym wysiłkiem, co należy docenić. Ponadto, różnica przewidywanej przez model i rzeczywistej częstotliwości podstawowej płyty wyniosła nieco ponad 5%, co jest wynikiem dobrym. Rzuci się jednak w oczy fakt braku istotnych różnic pomiędzy efektywnością aktuatorów o różnych kształtach. Dobrze to ukazują np. charakterystyki widoczne na Rys. 4.18. Obserwowane różnice są na tyle niewielkie, że może za nie odpowiadać wiele drobnych czynników, takich jak różnice pomiędzy egzemplarzami płyt, jakość spoiny kleju dwuskładnikowego, itp.

Reasumując stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie. Cel pracy nie został jednak osiągnięty, wbrew deklaracjom Autora. Jedno z najistotniejszych zastrzeżeń dotyczy wyciągania wniosków, których nie potwierdzają uzyskane wyniki. Choć

wyprowadzone modele można uznać za poprawne matematycznie, ich wartość nie została potwierdzona eksperymentalnie. Model, który może nie mieć związku z rzeczywistością, nie może potwierdzać postawionej w pracy tezy. Ponadto sposób prezentacji i opisu uzyskanych danych (zastrzeżenia przedstawiłem poniżej w uwagach szczegółowych) budzi wątpliwości odnośnie poziomu zrozumienia przez Doktoranta omawianych zagadnień.

### 3. Uwagi szczegółowe

W rozprawie zwróciłem uwagę na następujące kwestie:

1. Na stronie 4 w ostatnim akapicie zostało napisane: „Jako czujniki drgań powszechnie stosowane są akcelerometry piezoelektryczne (w postaci PZT lub piezoelektrycznej folii polimerowej PVDF)”. Plastry wykonane z materiałów piezoelektrycznych nie pozwalają mierzyć przyspieszenia - określenie „akcelerometry piezoelektryczne” może być mylące.
2. Na stronie 39 w pierwszym akapicie napisano: „Redukcja drgań z wykorzystaniem a-PZT wykazuje większą efektywność w całym rozpatrywanym zakresie częstotliwości dla każdego modu”.  
Mówienie o redukcji w całym zakresie częstotliwości, podczas pobudzenia układu sygnałem tonalnym, poddaje w wątpliwość zrozumienie doktoranta interpretowanych wyników. Pobudzając układ sygnałem o pojedynczej częstotliwości, możemy ocenić efekty redukcji tylko dla tej częstotliwości (zaniedbując zjawiska nieliniowe, których symulacja nie obejmowała). W pozostałym zakresie częstotliwości możemy jedynie obserwować wyciek widma.
3. Na stronie 40 w Tabeli 2.3 dla modu trzeciego położenie  $x_s$  różni się od  $x_a$ , choć algorytm optymalizacji wskazał na pełną symetrię aktuatora asymetrycznego ( $l_1 = l_2$ ). Co może być przyczyną?
4. Na stronie 55, w równaniach 3.24 i 3.25 pojawia się funkcja  $f(x,y)$ , nie jestem jednak pewien czy jest to ta sama funkcja w obydwu równaniach. Mógł wystąpić konflikt oznaczeń.
5. Na stronie 64, w ostatnim akapicie napisano: „Podobnie jak w przypadku belki, efektywność redukcji drgań została obliczona na podstawie amplitudy drgań płyty w punkcie”.  
Jak ten punkt został wybrany? Czy efektywność redukcji nie powinna być oceniana na podstawie miary oddającej efektywność redukcji dla całej płyty, np. poprzez uśrednienie drgań całej płyty?
6. Na stronie 88 napisano: „Jednakże kształt aktuatora ma wpływ na efektywność procesu redukcji drgań, stąd jego optymalizacja prowadzi do maksymalizacji efektywności redukcji”.  
Przedstawione wyniki wcale tego nie potwierdzają. Wniosek jest bezpodstawny.



Politechnika  
Śląska



UCZELNIA  
BADAWCZA  
INICJATYWA DOSKONALOSCI

#### 4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę omówione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej mgr inż. Romualda Kurasa stwierdzam, że nie spełniają one oczekiwań względem pracy doktorskiej. Wyciągnięte zostały wnioski niepotwierdzone uzyskanymi wynikami lub nawet sprzeczne z prezentowanymi wynikami. Zastrzeżenia budzi również poziom zrozumienia przez Doktoranta omawianych zagadnień, co objawia się w prezentacji wyników oraz ich interpretacji.

Na podstawie przedstawionej wyżej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Romualda Kurasa pt. „Optymalizacja kształtu aktuatora piezoelektrycznego w aktywnej redukcji drgań struktur dwuwymiarowych” nie spełnia wymagań i oceniam ją negatywnie.

dr. hab. inż. Stanisław Wrona

*Stanisław Wrona*