

dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. AGH  
Katedra Automatykacji Procesów  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, B-2, I p., pok. 104/3  
jaroslaw.konieczny@agh.edu.pl

Kraków, 09.06.2022 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Rada Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
wpłynęło dnia 20.06.2022  
nr 14 zał.

# Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jarosława Rzepeckiego  
pt. "Application of smart materials for selected vibration reduction problems"

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała nr 12/2022  
Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
Politechniki Śląskiej z dnia 15.03.2022 r.

## 1. Przedstawienie podstawowych danych o kandydacie

a. **data uzyskania tytułu magistra oraz nazwa jednostki organizacyjnej, w której ten tytuł został nadany,**

14 lipca 2016 r., Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej.

b. **informacja czy kandydat ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora w tym - o ile wynika to z dokumentacji sprawy - informacje o przebiegu i zakończeniu wcześniejszego postępowania,**

Według dostarczonej dokumentacji Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora w żadnej jednostce naukowej.

c. **przebieg pracy naukowo-zawodowej (miejsce pracy zajmowane stanowiska)**

przebieg pracy naukowo-zawodowej w trakcie trwania studiów doktoranckich:

✓ wrzesień 2021 - obecnie: Inżynier Badań i Rozwoju, 2D3TECH Sebastian Budzan, Piekary Śląskie, Polska,

✓ sierpień 2020 - wrzesień 2020: Wizytujący Naukowiec, Instytut Struktur Kompozytowych i Systemów Adaptacyjnych, Niemiecka Agencja Kosmiczna (DLR), Brunzwik, Niemcy,

przebieg pracy naukowo-zawodowej przed rozpoczęciem studiów doktoranckich:

- ✓ luty 2016 - lipiec 2016: Asystent Laboratoryjny, Tenneco Automotive, Rybnik, Polska,
- ✓ lipiec 2015 - październik 2015: Asystent Laboratoryjny, Tenneco Automotive, Rybnik, Polska,
- ✓ czerwiec 2014 - wrzesień 2014: Asystent Laboratoryjny, Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki "Energopomiar-Elektryka", Gliwice, Polska,
- ✓ lipiec 2013 - wrzesień 2013: Asystent Laboratoryjny, Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki "Energopomiar-Elektryka", Gliwice, Polska.

## **2. Przedstawienie informacji o ocenianej rozprawie doktorskiej**

### **a. Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora.**

Tytuł oryginalny w języku angielskim "Application of smart materials for selected vibration reduction problems". Tytuł w języku polskim „Zastosowanie materiałów inteligentnych w wybranych problemach redukcji drgań”

### **b. Ocena układu rozprawy doktorskiej w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych.**

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Autor dołączył do dokumentacji streszczenie w języku polskim i angielskim. Część merytoryczna pracy mieści się na 111-stu stronach i składa się z 6-cu rozdziałów głównych wraz z wnioskami oraz bibliografii.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił ogólne informacje dotyczące redukcji drgań i materiałów inteligentnych, w tym studium literaturowe związane z zakresem pracy.

W rozdziale drugim Kandydat zamieścił wykaz elementów wyposażenia laboratoryjnego wraz z głównymi parametrami. Ponadto, krótko opisano platformy sprzętowe użyte w badaniach w eksperymentach. Rozdział ten zawiera również opis procesu projektowania i optymalizacji macierzy mikrofonów oraz budowę zaproponowanej kamery akustycznej.

Rozdział trzeci dotyczy obudowy urządzenia z pojedynczym panelem jako przednią ścianką. Badano dwie różne płyty: stalową i aluminiową. W pierwszej części znajduje się krótkie wprowadzenie. W drugiej części przedstawiono i opisano modele matematyczne płyt. Informacje zawarte w tej sekcji były niezbędne do uzyskania form własnych i odpowiadających im częstotliwości własnych dla obu paneli. Część trzecia zawiera studium literaturowe dotyczące systemów piezoelektrycznego tłumienia bocznikowego (PSDa). Sekcja ta zawiera również wyniki eksperymentalne dla obu paneli z odpowiednio pięcioma i dziewięcioma

elementami piezoelektrycznymi. Sekcja piąta zawiera badanie wpływu rodzaju materiału ścianek pokrywających obudowę urządzenia na pasmo przenoszenia panelu przedniego. W kolejnej sekcji wstępnie przetestowano nowy elektromagnetyczny element sprzęgający. Ostatnia część stanowi dyskusję wyników badań przedstawionych w tym rozdziale.

W rozdziale czwartym omówiono obudowę urządzenia z ścianą dwupłytkową. Pierwsza część zawiera krótkie studium literaturowe dotyczące badań opartych na tej strukturze. Druga część przedstawia nowy typ elektromagnetycznego aktuatora z najważniejszymi informacjami o zasadzie działania i jego właściwościach. Przedstawiono również wyniki eksperymentalne dla pojedynczego i pięciu aktuatorów. W kolejnym podrozdziale omówiono zmodyfikowaną metodę Chladniego do wizualizacji postaci drgań struktury drgającej. Oprócz opisu, przedstawiono również wyniki eksperymentalne dla aktuatora elektromagnetycznego sterowanego w trybie semiaktywnym, a także pasywnego połączenia magnetycznego. Ostatnia część podsumowuje badania opisane w całym rozdziale.

Rozdział piąty zawiera analizę teoretyczną i eksperymentalną zawieszenia pojazdu terenowego (ATV). W pierwszej części pokrótce omówione zostało zawieszenie pojazdu. W drugiej części opisany jest model matematyczny zawieszenia wykorzystującego amortyzatory MR. Informacje zawarte w tym rozdziale służą do implementacji algorytmu tłumienia drgań, realizowanego w kolejnym rozdziale. Część czwarta opisuje zastosowane podejście do szacowania prędkości zawieszenia w celu skuteczniejszego tłumienia drgań wzbudzanych przez pojazd. Ostatnia część podsumowuje rozważania zawarte w tym rozdziale.

Rozdział szósty jest podsumowaniem rozprawy i przedstawia główne wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych eksperymentów. Zawiera również wkład Autora i omówienie kierunków planowanych dalszych prac.

Układ rozprawy jest czytelny i adekwatny do zakresu pracy.

### **c. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej.**

Powołane źródła literaturowe obejmują łącznie 115 pozycji, większość z nich odnosi się do aktualnego stanu wiedzy w zakresie zastosowania materiałów inteligentnych w wybranych problemach redukcji drgań mechanicznych. Ponad połowa cytowanych pozycji literaturowych to prace pochodzące z ostatnich dziesięciu lat. Dziewięć to publikacje z 2021 roku, a osiem z 2020. W przypadku piętnastu pozycji mgr inż. Jarosław Rzepecki występuje jako współautor, a w pięciu z nich jest pierwszym autorem. Cytowane artykuły dotyczą zagadnień związanych z

systematyką rozprawy doktorskiej. Literatura cytowana jest w sposób prawidłowy i jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy a dobór poszczególnych pozycji jest uzasadniony merytorycznie. Autor bardzo rzetelnie podchodzi do przedstawienia aktualnego stanu wiedzy – jest to mocna strona recenzowanej rozprawy.

**d. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata.**

Głównym problemem badawczym rozprawy była weryfikacja możliwości skutecznego zastosowania elementów wykonawczych wykorzystujących materiały inteligentne w celu redukcji drgań zawieszenia pojazdu i obudowy urządzenia. Przedstawione w rozprawie przykłady zawieszenia i obudowy wybrano spośród szerokiej gamy możliwych zastosowań. Dodatkowo autor sformułował tezę:

„Możliwa jest efektywna redukcja drgań struktur mechanicznych dzięki wykorzystaniu materiałów inteligentnych, opartych na zjawisku indukcji elektrycznej lub elektromagnetycznej w celu kontroli sztywności struktury w wybranych obszarach lub tłumienia drgań w wybranych punktach struktury”.

Tezę tę udowodnił przeprowadzając liczne eksperymenty potwierdzone pomiarami laboratoryjnymi. Sformułowany przez Autora cel jest bardzo ogólny, a jego realizacja jest możliwa na wiele sposobów. Dlatego do kontroli drgań Autor wybrał elementy wykonawcze wykorzystujące zjawiska indukcji elektrycznej lub elektromagnetycznej. Podjęta problematyka pracy jest bardzo aktualna, cel i teza pracy zostały sformułowane poprawnie.

**e. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych.**

Zastosowane przez Autora metody badawcze polegają na studiach literaturowych, analizie krytycznej źródeł, intuicyjnych metod wynikających z obserwacji zjawisk fizycznych oraz badaniach eksperymentalnych pozwalających na zebranie danych doświadczalnych. Analiza danych eksperymentalnych jest podstawą do formułowania wniosków oraz planowania dalszych prac badawczych. Wybrane przez Autora obiekty badań wynikają z możliwości eksperymentalnych realizowanych w zespole badawczym, którego Autor jest członkiem. Są to:

- zawieszenie pojazdu z sterowanymi tłumikami magneto-reologicznymi,
- obudowa urządzenia z pojedynczymi panelami będącymi elementami dźwiękochłonnymi,
- obudowa urządzenia z dwupanelową strukturą stanowiącą strukturę dźwiękochłonną.

W obydwu obudowach panele dźwiękochłonne były sterowane za pomocą aktuatorów inteligentnych.

Zastosowane metody badawcze są dobrze dobrane do postawionego celu pracy. Brakującym elementem pracy jest analiza fizycznych zjawisk oraz modeli matematycznych wybranych do badań obiektów sterowania. Analiza ta została zastąpiona licznymi testami laboratoryjnymi oraz weryfikacją zaproponowanych koncepcji na drodze eksperymentu badawczego.

#### **f. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań.**

Liczne badania zaprezentowane przez Autora to bardzo mocna część pracy. Zastosowanie różnych platform sprzętowych, czujników pomiarowych oraz modułów kontrolno-sterujących świadczy o dużym doświadczeniu Doktoranta. Każda z zastosowanych platform sprzętowych jest obsługiwana przez odmienne systemy operacyjne oraz programowana z różnych platform programistycznych. Szkoda, że Autor nie przedstawił w pracy więcej szczegółów dotyczących części programistycznej.

Liczne tabele i wykresy ułatwiają interpretację wyników przeprowadzonych eksperymentów. Rysunki i fotografie są czytelne i dobrze dobrane. Wykresy przebiegów wielkości fizycznych będące wynikiem pomiarów i analiz są dobrze opisane. Osie wykresów są opisane wraz z jednostkami zaprezentowanych wielkości fizycznych. Na uwagę zasługuje zaproponowana przez Autora modyfikacja metody Chladniego do prezentacji form modalnych drgających struktur membranowych.

Każdy z rozdziałów zawierających badania kończy się dyskusją otrzymanych wyników. Autor formułuje wnioski szczegółowe oraz uogólnia je do generalnych konkluzji. Wyniki badań są przedstawione w sposób ciekawy, a ich graficzna prezentacja nie budzi zastrzeżeń. Przedstawione i sformułowane wnioski są poprawne i wynikają z przeprowadzonych badań.

#### **g. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań.**

Praca ma charakter praktyczny. Autor przedstawia realizację i zastosowanie metod sterowania drganiami konstrukcji panelowych, mogących stanowić podstawę do realizacji obudów urządzeń gospodarstwa domowego emitujących drgania i hałas. Wyniki analiz mają bezpośrednie przełożenie na dobór materiałów dźwiękochłonnych i dobór elementów wykonawczych sterowanego układu redukcji drgań. W pracy, oprócz metod sterowania i badań, Autor przedstawia rozwiązania konstrukcyjne oraz parametry technologiczne paneli. Ponadto, praca może być cennym źródłem wiedzy związanej z układem pomiarowo-

sterującym dedykowanym do nowoczesnych wysokowydajnych obudów urządzeń wyposażonych w źródło drgań. Doktorant zaproponował również interesujące podejście do estymacji prędkości względnej zawieszenia pojazdu kołowego. Uzyskane wyniki zostały porównane do klasycznych metod bazujących na pomiarach przyspieszeń.

**h. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej.**

Z dostarczonej dokumentacji nie wynikają nieprawidłowości, które mogłyby mieć negatywny wpływ na ocenę końcową pracy.

**i. Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

Oceniana rozprawa pozwala stwierdzić, iż wykorzystując zjawiska indukcji elektrycznej lub elektromagnetycznej w materiałach inteligentnych można skutecznie redukować drgania struktur mechanicznych. Można tego dokonać poprzez kontrolę sztywności konstrukcji w wybranych obszarach lub tłumienie drgań w wybranych punktach konstrukcji. Oryginalność rozwiązania dotyczy w głównej mierze zaproponowanych rozwiązań sprzętowych, pomiarowych, sterujących i wykonawczych. Aplikacja znanych z literatury algorytmów sterowania drganiami uwzględnia ograniczenia sprzętowe oraz możliwości fizycznej realizacji. Ponadto do oryginalnych osiągnięć zaliczyć można:

- projekt i optymalizację rozmieszczenia zestawu mikrofonów do budowy kamery akustycznej, przeznaczonej do analizy hałasu emitowanego przez panel wibracyjny,
- opracowanie koncepcji półaktywnego elementu elektromagnetycznego do tłumienia drgań poprzecznych konstrukcji płaskich,
- wdrożenie i eksperymentalną walidację efektywności półaktywnego tłumika elektromagnetycznego z elektromagnesem push-pull,
- opracowanie inteligentnej struktury, wykorzystującej podwójny panel z półaktywnymi sprzężeniami elektromagnetycznymi,
- opracowanie metody analizy postaci drgań wibrujących struktur płaskich na podstawie figur Chladniego.

**j. Ocena czy rozprawa doktorska reprezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.**

Przedstawiona do recenzji rozprawa prezentuje wysoki poziom naukowy oraz edytorski i zawiera wieloaspektowy opis sterowanych struktur dynamicznych przebadanych przez Kandydata. Stwierdzam, że Doktorant potrafi prowadzić badania naukowe w zakresie budowy układów pomiarowych i sterujących oraz analizy i przetwarzania sygnałów. W szczególności podkreślić należy umiejętność prowadzenia badań eksperymentalnych. Opracowanie tematu podjętego przez Doktoranta stanowi oryginalny wkład w badania eksperymentalne obudów dźwiękochłonnych wykorzystujących metody sterowania drganiami.

Z lektury przedstawionej rozprawy doktorskiej wynika, że Kandydat dysponuje zarówno wiedzą ogólną w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika – potwierdzeniem są studia literaturowe, których wynikiem jest dobrze opracowany aktualny stan wiedzy – jak i szczegółową wiedzę w zakresie sterowania pomiarów i analizy danych, czego potwierdzeniem jest część eksperymentalna pracy. Kandydat potrafi dobrze interpretować wyniki badań i wyciąga wnioski oraz uogólnienia dotyczące zebranego materiału eksperymentalnego. Doktorant wykazuje również aktywność w popularyzowaniu wiedzy poprzez udział w konferencjach naukowych oraz projektach badawczych. Ponadto jest współautorem patentu i trzech kolejnych zgłoszeń patentowych.

### **3. Uwagi do pracy, zagadnienia do dyskusji i pytania do wyjaśnienia**

#### **Uwagi ogólne**

1. Autor przedstawił liczne pomiary bez dyskusji błędów pomiarowych oraz analizy niepewności pomiarów.
2. Autor nie podaje parametrów zrealizowanych torów pomiarowych. W pracy brak szczegółowego opisu systemu pomiarowego.
3. Autor nie odnosi się do zagadnienia synchronizacji kanałów pomiarowych, torów pomiarowych zwłaszcza w przypadku realizacji pomiarów na kilku systemach pomiarowych. Przykładowo, na rysunku 2.13 przedstawiono system pomiarowy złożony z mikrofonów (brak informacji o synchronizacji kanałów) oraz kamery Basler (brak informacji o korelacjach czasowych pomiędzy systemem wizyjnym i pomiarami akustycznymi).
4. Przy realizacji układów sterowania niezbędna jest synchronizacja i zapewnienie odpowiednich relacji czasowych pomiędzy pomiarem a sterowaniem.

5. Formuły matematyczne praw sterowania, z wyjątkiem algorytmu skyhook, nie zostały sformułowane.
6. Dlaczego do obliczenia PSD wybrano metodę Welcha? Proszę podać podstawowe różnice pomiędzy metodą Welcha i Bartletta.
7. Rozważane zagadnienia z użyciem różnych paneli tłumiących powinny odnosić się do ich parametrów mechanicznych takich, jak: gęstość, moduł Younga, moduł Helmholtza, moduł Kirchhoffa, współczynnik Poissona itp.

#### **Uwagi i pytania szczegółowe**

8. Na rysunku 3.5 i dalszych zakres częstotliwość wynosi 0 - 500 Hz. Dlaczego Autor wybrał do analizy górną częstotliwość równą 260 Hz.
9. Główny wniosek z badań przedstawionych w podrozdziale 3.5 jest taki, że sklejka z dodatkową warstwą jest najbardziej korzystna dla redukcji drgań w porównaniu z innymi rozważanymi materiałami. Proszę o szersze uzasadnienie tego wniosku.
10. Energia drgań przedstawiana w pracy na charakterystykach częstotliwościowych jest podawana w dB. Proszę o uzasadnienie takiej miary dla gęstości widmowej energii ESD oraz podanie algorytmu (sposobu) obliczania.
11. Na rysunku 4.6 rozpiętość histerezy wynosi 17 mN dla zmiany o 1% wypełnienia PWM. Jaka była rozdzielczość (i dokładność) sterowania współczynnikiem wypełnienia. Czy 17 mN to znacząca zmiana.
12. Z charakterystyk zaprezentowanych na rysunkach 4.4 i 4.5 wynika, że rozważania przedstawione w podrozdziale 4.2.4 powinny być przeprowadzone dla wyższych współczynników wypełnienia sygnału sterującego PWM tam, gdzie zaobserwować można wpływ na generowaną siłę. Badania przeprowadzono dla wartości 0%, 25%, 50%, 75%. Czy nie należało zagęścić pomiarów w obszarze 80%-99% kosztem obszaru, w którym brak realnego wpływu na generowaną siłę?
13. Wniosek z dyskusji przedstawionej w podrozdziale 4.4 „zastosowanie sprzężenia centralnego zmniejsza drgania w liniach węzłowych, podczas gdy drgania w anty-węzłach zostały zwiększone”. W moim odczuciu wniosek na wyrost. Zachowanie to zależy (powinno zależeć) od algorytmu sterowania. Ten wpływ nie był testowany przez Autora. Wskaźnik jakości przyjęty do syntezy sterowania definiuje efektywność pracy zarówno



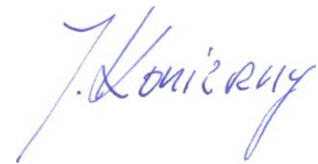
semiaaktywnego, jak i aktywnego układu sterowania drganiami. Sygnały sprzężenia nie są jedynym czynnikiem decydującym o efektywności sterowania.

14. Na stronie 43 Autor pisze "number of peaks and valleys are significantly higher between 75 Hz and 210 Hz". Liczba pików zależy od parametrów metody wyznaczania PSD (ESD). Autor tych parametrów nie podaje w pracy.
15. Na stronie 90 jest zdanie "the vertical speed of unsprung mass is higher than the vertical speed of sprung mass". Czy Autor miał na myśli szybkość chwilową (instantaneous speed) czy prędkość - vertical velocity. Speed - szybkość jest wielkością skalarną.
16. We wzorze 5.8 Autor wprowadza współczynnik wagowy  $\rho$  o wartości dobranej eksperymentalnie 0,925. Proszę przybliżyć, jaki eksperyment został wykonany i jakich metod badawczy użyto.
17. Autor zaproponował obliczanie prędkości ze wzoru 5.9. Czy rozważane były inne metody obliczania pochodnej przemieszczenia - jeżeli tak, to jakie i dlaczego wybrano metodę dwupunktowej wstecznej różnicy przemieszczeń.
18. Autor, na zakończenie podrozdziału 5.4. zatytułowanego "Estimation of suspension velocity using LVDT" stwierdza, że „pomimo podobnych wyników dla obu czujników, można zauważyć, że montaż czujnika LVDT na tych samych śrubach, co amortyzator MR, dostarcza bardziej wiarygodnych informacji o prędkości pionowej zawieszenia”. Nie zgadzam się, nie przedstawiono pomiaru ani oceny rzeczywistej prędkości, obydwie zaproponowane metody - zarówno różniczkowanie przemieszczenia, jak i obliczenia na podstawie sygnału przyspieszenia - są jedynie estymatorami prędkości względnej i trudno stwierdzić na podstawie przedstawionych wyników, która metoda daje bardziej wiarygodne wyniki.

#### **4. Konkluzja**

Przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi zdaniem recenzenta oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego. Kandydat samodzielnie rozwiązał zagadnienie badawcze z zakresu dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej. Wyniki badań dowodzą słuszności tezy sformułowanej przez Doktoranta oraz jego dobrego przygotowania do prowadzenia badań naukowych i realizacji

prac badawczych. Uwagi sformułowane w punkcie 3 recenzji mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony. Przedstawiona do recenzji praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późn. zm.), w związku z tym **wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej pt. "Application of smart materials for selected vibration reduction problems" autorstwa mgr inż. Jarosława Rzepeckiego oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Koniarczyk', is positioned to the right of the main text block.