



**Prof. zw. dr hab. inż. Adam Kowalewski**

Tel: (12) 617-28-51, fax: (12) 634-15-68,  
e-mail: ako@agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej  
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30

D K K	Biuro Dziekana	
	Wpłynęło dnia	10.10.2015
	Nr	14 / zał.

Kraków, dnia 7 października 2015 roku

### **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Krauzego pt. „Control of Semiactive Vehicle Suspension System Using Magnetorheological Dampers”**

Przedstawiona recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Krauzego asystenta w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, zatytułowanej „Control of Semiactive Vehicle Suspension System Using Magnetorheological Dampers” („Sterowanie półaktywnym układem zawieszenia pojazdu z zastosowaniem tłumików magnetoreologicznych”).

Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest Prof. nadzw. dr hab. inż. Jerzy Kasprzyk. Recenzję przygotowano na zlecenie Dziekana Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach Pana Prof. zw. dr hab. inż. Adama Czornika działającego na podstawie uchwały Rady Wydziału o powołaniu Recenzentów z dnia 29 września 2015 roku.

#### **I. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa składa się ze streszczenia w języku angielskim, podziękowań, istotnego wkładu autora rozprawy, szkicu dysertacji, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń i symboli, 8 rozdziałów, 3 załączników oraz spisu literatury zawierającego 164 pozycje.

We wstępie (rozdział 1) zaprezentowano układy aktywne wyposażone w elementy wykonawcze jako przykład alternatywnego rozwiązania pozwalającego na zmianę parametrów zawieszenia. Elementy półaktywne stanowią rozwiązanie kompromisowe w porównaniu z energochłonnymi elementami aktywnymi i nieadaptacyjnymi tłumikami pasywnymi. Przykładem elementów półaktywnych są tłumiki MR (magnetoreologiczne), których charakterystyczną cechą jest możliwość szybkich zmian parametrów tłumienia w czasie jazdy, a tym samym dostosowanie do warunków aktualnie panujących na drodze.

W przypadku tłumików MR steruje się dyssypacją energii drgań. Kluczowym elementem tłumika MR jest cylindryczna obudowa wypełniona cieczą MR. Ciecz MR składa się z cząstek wielkości kilku mikrometrów wykonanych najczęściej z żelaza, zawieszonych w cieczy nośnej, najczęściej oleju mineralnym, syntetycznym lub glikolu. Sterowanie parametrami tłumika MR odbywa się za pomocą cewek indukujących pole magnetyczne zlokalizowanych w szczelinach tłoczyska, przez które przepływa ciecz MR. Pod wpływem pola magnetycznego cząstki cieczy MR tworzą wewnątrz szczelin struktury łańcuchowe wzdłuż linii pola i prostopadle do ruchu cieczy przeciwdziałając jej ruchowi. Opisane zjawisko jest w rezultacie przyczyną zmian właściwości tłumika MR obserwowanych w skali makroskopowej. Ponadto omówiono cele i zakres rozprawy oraz sformułowano tezę rozprawy. Teza dysertacji została sformułowana w następujący sposób:

Wybrane algorytmy zastosowane do sterowania układem zawieszenia pojazdu z tłumikami magnetoreologicznymi i wykorzystanie informacji o profilu drogi pozwalają na poprawę komfortu jazdy, przyczepności do nawierzchni drogi, a także umożliwiają zmniejszenie średniego ugięcia zawieszenia.

Pozostałe cele rozprawy to:

- a) Zdefiniowanie modelu tłumika MR i jego odwrotnego odpowiednika oraz zastosowanie ich w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych.
- b) Rozwinięcie, walidacja i analiza nieadaptacyjnych i adaptacyjnych algorytmów sterowania tłumikami MR, z których wybrane pozwalają na wykorzystanie informacji o profilu drogi dostępnej z wyprzedzeniem.
- c) Implementacja i analiza wybranych algorytmów tłumienia drgań z zastosowaniem systemu sterowania półaktywnym zawieszeniem pojazdu eksperymentalnego.

Rozdział 2 dotyczy wibracji pojazdów drogowych dla przypadku szerokopasmowego wymuszenia stochastycznego, wymuszenia ciągłego sinusoidalnego oraz pojedynczego wymuszenia uderzeniowego. Dokonano analizy wibracji w dziedzinie czasu i częstotliwości. Zdefiniowano wskaźniki jakości komfortu jazdy oraz przyczepności do nawierzchni drogi.

W następnym rozdziale (rozdział 3) zaprezentowano system sterowania układem zawieszenia z zastosowaniem tłumików MR zainstalowany w terenowym pojeździe eksperymentalnym rzeczywistych rozmiarów typu ATV-Sweden Allroad 500. Zastosowane w pojeździe eksperymentalnym tłumiki MR typu RD-8040-1 i RD-8041-1 produkcji Lord Corporation zostały przebadane przy użyciu stanowiska MTS przeznaczonego do badań właściwości dynamicznych. Przeprowadzono analizę wpływu częstotliwości i amplitudy wymuszenia osiowego tłumika na jego działanie. Następnie, w celu dalszej analizy algorytmów sterowania wyznaczono model tłumika uzyskany dla częstotliwości wymuszenia równej 1.5 Hz dobranej na podstawie właściwości typowych pojazdów. Zaproponowano dwa modele tłumika MR, tj. model Spencera-Dyke'a i model bazujący na funkcji tanh w celu wyznaczenia modelu odwrotnego tłumika MR zastosowanego w algorytmie sterowania.

Rozdział 4 dotyczy dynamiki układu zawieszenia pojazdu z tłumikami MR. W badaniach symulacyjnych zastosowano model półkowy drgań pojazdu o 4 stopniach swobody opisujących pochylenie wzdłużne i pionowy ruch nadwozia pojazdu w jego środku ciężkości jak i pionowy ruch przednich i tylnych kół. Przetestowano działanie algorytmów tłumienia drgań dla dwóch typów wymuszeń, tj. wybojów jako przykładu wymuszenia pojedynczego i różnych częstotliwości wymuszenia ciągłego sinusoidalnego. Przeprowadzono ocenę skuteczności tłumienia drgań z zastosowaniem wskaźników wyznaczanych w dziedzinie czasu i częstotliwości. Ponadto, dla analizy porównawczej algorytmów sterowania zdefiniowano wskaźniki komfortu jazdy i przyczepności do nawierzchni drogi.

W rozdziale 5 omówiono problem sterowania półaktywnego wibracjami pojazdu drogowego. Zaprezentowano topologię półaktywnego sterowania. Dokonano syntezy klasycznych schematów sterowania dla przypadku problemu LQ w odniesieniu do tłumików MR oraz algorytmu Skyhook sterowania wibracjami pojazdu. Dokonano również optymalizacji i wiarygodności sterowania wibracjami dla następujących problemów:

- a) Optymalizacja modelu połówkowego samochodu dla przypadku sterowania LQ oraz sterowania typu Skyhook.
- b) Optymalizacja modelu ćwiartkowego samochodu w odniesieniu do sterowania typu Skyhook.
- c) Analiza problemu LQ oraz schematów sterowania typu Skyhook.
- d) Poprawa komfortu jazdy i przyczepności do nawierzchni drogi oraz diagramy średniego ugięcia zawieszenia.
- e) Analiza półaktywnego sterowania dla przypadku pojedynczego wymuszenia uderzeniowego.

Z kolei rozdziale 6 przeprowadzono badania symulacyjne adaptacyjnych algorytmów sterowania. Zmiany parametrów w czasie eksploatacji są nieodłączną cechą pojazdów drogowych. Silne nieliniowości występujące w pracy tłumików zamontowanych w układzie zawieszenia dodatkowo wpływają na zachowanie się pojazdu na drodze. Stąd, istnieje potrzeba uwzględnienia w algorytmach sterowania mechanizmów adaptacji, które w czasie rzeczywistym pozwoliłyby analizować dynamikę pojazdu i dostosowywać do niej parametry algorytmu sterowania. Badania symulacyjne algorytmów tłumienia drgań przeprowadzono przy użyciu środowiska symulacyjnego składającego się z dwóch części. Pierwsza część zawierająca model drgań pojazdu i model tłumika MR symulowana była w czasie quasi-ciągłym na bazie numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych. Drugą część stanowi algorytm sterowania działający w czasie dyskretnym zawierający model odwrotny Tanh. Sygnałami dostępnymi dla układu sterowania są prędkości i przyspieszenia opisujące ruch nadwozia i kół pojazdu oraz prędkości względne dla każdego z tłumików MR. Ponadto, w przypadku badań symulacyjnych założono dostępność przemieszczenia względnego tłoka tłumika oraz sygnały informujące o profilu drogi przed pojazdem. Wśród algorytmów adaptacyjnych wyróżnia się metody adaptacji bezpośredniej i pośredniej. W przypadku metod bezpośrednich mechanizm adaptacji bezpośrednio ingeruje w parametry sterowania. Dla metod pośrednich adaptacja jest wprowadzona w formie algorytmu estymacji parametrów sterowanego obiektu, a sam algorytm sterowania jest tworzony niezależnie i bazuje na zidentyfikowanych parametrach. Wadą algorytmów adaptacyjnych jest konieczność zapewnienia wymuszenia ciągłego. Stąd, badania powyższych algorytmów ograniczono do symulacji z powodu trudności występujących w generacji ciągłego wymuszenia drgań pojazdu eksperymentalnego.

W rozdziale 7 przeprowadzono badania eksperymentalne klasycznych algorytmów sterowania z grupy Skyhook. Implementacja algorytmów sterowania w pojeździe eksperymentalnym wymagała wstępnego przetwarzania danych pomiarowych, w tym wcześniejszej estymacji sygnałów prędkości z uwzględnieniem filtracji zakłóceń pochodzących od silnika pojazdu. Algorytm sterowania wymaga dostępności sygnałów prędkości związanych z czterema skrajnymi punktami nadwozia oraz ze wszystkimi kołami pojazdu. Do oceny skuteczności tłumienia drgań wykorzystano pomiary przyspieszenia mierzone w części nadwozia pojazdu oraz przyspieszenie pochyłu wzdłużnego nadwozia. W przypadku systemów sterowania układem zawieszenia dysponującymi mniejszymi zasobami obliczeniowymi algorytm Skyhook może być uproszczony do niezależnego sterowania każdą ćwiartką układu



zawieszenia, oznaczonego jako SH1. Dla pojazdu eksperymentalnego przetestowano również algorytm tłumiący prędkość pochyłu nadwozia oznaczony jako SH-pitch.

W ostatnim rozdziale (rozdział 8) zaprezentowano podsumowanie przeprowadzonych badań oraz istotny wkład Autora rozprawy, a także dalsze kierunki badań.

## II. Uwagi ogólne

Przystępując do oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że praca jest **bardzo dobrze** napisana.

Recenzowana rozprawa zawiera dobrze sformułowany oryginalny i ważny problem naukowy oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autora rozprawy samodzielnie i przy użyciu poprawnej metodologii naukowej. Tak więc już na podstawie wstępnej analizy można stwierdzić, że jest to dzieło **bardzo wartościowe**, zdecydowanie odpowiadające wymaganiom stawianym przez **odnośną ustawę**.

Autor rozprawy podjął zadanie bardzo ambitne, ponieważ problematyka sterowania półaktywnym układem zawieszenia pojazdu z zastosowaniem tłumików magnetoreologicznych stanowi bardzo trudny dział automatyki przemysłowej.

Uzyskane przez Autora rezultaty są bardzo interesujące i wartościowe, a zwłaszcza przygotowanie w pełni funkcjonalnego systemu sterowania zawieszeniem dla pojazdu eksperymentalnego.

W sumie Autor rozprawy wykazał szeroką wiedzę w trudnej dziedzinie identyfikacji, modelowania matematycznego, filtracji sygnałów, badań symulacyjnych i eksperymentalnych oraz teorii sterowania i umiejętność jej twórczego zastosowania do uzyskania nowych, wyróżniających rezultatów o charakterze teoretycznym i aplikacyjnym.

## III. Oryginalne osiągnięcia

Głównym celem recenzowanej rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie badań nad algorytmami tłumienia drgań w pojazdach drogowych wyposażonych w tłumiki magnetoreologiczne. Badania przeprowadzono w środowisku symulacyjnym jak i przy użyciu eksperymentalnego pojazdu terenowego, w którym zainstalowano system sterowania tłumikami magnetoreologicznymi. Wymaganiem dla przeprowadzenia badań było przygotowanie stanowiska badawczego, implementacja proponowanych algorytmów i opracowanie metodyki ich testowania.

W ramach pracy prowadzono badania symulacyjne z zastosowaniem modelu połówkowego drgań pojazdu o 4 stopniach swobody, uwzględniającego model Spencera-Dyke'a tłumika MR. W przypadku badań eksperymentalnych testowano skuteczność tłumienia drgań w pojeździe terenowym, który został wyposażony w system sterowania półaktywnym układem zawieszenia i tłumiki MR.

W ramach realizacji sformułowanych celów rozprawy **uzyskano nowe, oryginalne, wyróżniające rezultaty do których zaliczam:**

1. Rozwinięcie idei sterowania drganiami z zastosowaniem tłumików MR.
2. Zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu FxLMS do adaptacyjnego sterowania tłumikami MR w modelu pojazdu drogowego.
3. Zaproponowanie wykorzystania informacji o profilu drogi dostępnej z wyprzedzeniem w algorytmie sterowania przez zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu FxMLS.
4. Synteza i implementacja algorytmu identyfikacji online modelu tłumika MR, który korzysta tylko z sygnałów kinematycznych.
5. Implementacja i analiza wybranych algorytmów tłumienia drgań dla systemu sterowania układem zawieszenia w pojeździe eksperymentalnym.
6. Synteza i analiza algorytmów z grupy Skyhook dla sterowania drganiami pojazdu.
7. Modelowanie histerezy widocznej na charakterystyce siła-prędkość za pomocą filtra o zadanej charakterystyce fazowej.
8. Analiza różnych podejść do modelowania zachowania się tłumików MR.

Należy zatem stwierdzić, że sformułowane cele rozprawy zostały osiągnięte, a jej Autor wykazał się szeroką wiedzą i umiejętnościami niezbędnymi do samodzielnego rozwiązywania nowych, oryginalnych problemów naukowo-technicznych w dyscyplinie Automatyka i Robotyka.

#### IV. Uwagi końcowe

Pomimo, że recenzowana rozprawa doktorska jest napisana pod względem merytorycznym bardzo dobrze, to jednak nasuwają się pewne uwagi natury dyskusyjnej, a mianowicie:

1. Który rezultat uzyskany w rozprawie Autor dysertacji uważa za najcenniejszy i najbardziej oryginalny?
2. Model tłumika MR.
3. Model połówkowy drgań pojazdu o 4 stopniach swobody.
4. Wskaźniki jakości komfortu jazdy oraz przyczepności do nawierzchni drogi.
5. Algorytm Skyhook.
6. Metody adaptacji pośredniej.
7. Dalsze kierunki badań.

Przechodząc do oceny redakcyjnej rozprawy doktorskiej stwierdzam z satysfakcją, że dysertacja doktorska jest bardzo dobrze napisana w języku angielskim i została doskonale zredagowana.

## V. Ocena ogólna, wnioski końcowe

Opiniowana rozprawa robi generalnie **bardzo korzystne** wrażenie i nie ulega wątpliwości, że jako rozprawa doktorska może być oceniona wyłącznie **bardzo pozytywnie**. Autor rozprawy wykazał szeroką wiedzę w dyscyplinie Automatyka i Robotyka i **umiejętność jej twórczego zastosowania do uzyskania nowych, oryginalnych, zasługujących na wyróżnienie rezultatów**.

Oczywiście przytoczone uwagi mają charakter dyskusyjny i nie mają żadnego związku z **bardzo wysoką oceną merytoryczną recenzowanej rozprawy**.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Krauzego spełnia z nadmiarem wszystkie wymagania odnośnej ustawy sejmowej i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Adam Kowalewski

