Gliwice, 15.10.2015

Dr hab. inż. Jarosław Figwer
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska w Gliwicach

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Control of Semiactive Vehicle Suspension System Using Magnetorheorogical Dampers

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Krauze

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Jerzy Kasprzyk

1. Zakres, charakter i cel rozprawy

W ostatnich trzydziestu latach powstało wiele doświadczalnych i komercyjnych pojazdów wyposażonych w aktywne lub półaktywne zawieszenie. Sterowanie takimi zawieszeniami jest bardzo ciekawym problem badawczym, którym zajmują się zarówno ośrodki branżowe jak i instytucje naukowe. Podjęta w ramach niniejszej rozprawy problematyka sterowania zawieszeniem półaktywnym wyposażonym w tłumiki magnetoreologiczne stanowi krok we włączeniu się w tę tematykę badawczą Zakładu Pomiarów i Systemów Sterowania, Instytutu Automatyki Politechniki Śląskiej. W tym celu zawieszenie pojazdu typu ATV-Sweden Allroad 500 wyposażono w tłumiki magnetoreologiczne typu RD-8041-1 produkcji firmy Lord Corporation. Na pojeździe zamontowano również odpowiedni system sterowania nimi. Autor rozprawy podjął się opracowania algorytmów sterowania zawieszeniem magnetoreologicznym, tak by ograniczyć wpływ drgań wywoływanych ruchem pojazdu wyposażonego w tłumiki magnetoreologiczne na jego pasażerów oraz zapewnić odpowiednie bezpieczeństwo poruszania się pojazdem. Z punku widzenia automatyki sterowanie zawieszeniem magnetoreologicznym pojazdu jest ciekawym problemem sterowania obiektem wielowejściowym o nieliniowości wprowadzanej głównie przez elementy wykonawcze. Autor w ramach rozprawy prowadzi rozważania obejmujące budowę odpowiednich modeli matematycznych, identyfikację ich parametrów oraz syntezę nieadaptacyjnych i adaptacyjnych algorytmów sterowania zawieszeniem

pojazdu. Prowadząc rozważania, w sposób umiejętny łączy badania symulacyjne z wynikami eksperymentów na obiekcie rzeczywistym.

2. Zawartość rozprawy

Oceniana rozprawa liczy 197 stron, przy czym 146 stron stanowi tekst rozprawy, który podzielono na 8 rozdziałów. Pozostałe 51 stron to streszczenie, podziękowania, określenie wkładu do dziedziny, załączniki, lista skrótów, lista symboli i bibliografia.

Rozdział pierwszy jest krótkim wprowadzeniem do zagadnienia sterowania zawieszeniem pojazdu z wykorzystaniem jako elementu wykonawczego tłumika magnetoreologicznego. Autor dyskutuje w nim problem komfortu jazdy pasażera i bezpieczeństwa ruchu pojazdu, wprowadza do sterowania półaktywnego zawieszeniem pojazdu, formułuje tezę oraz cele szczegółowe rozprawy.

W rozdziale drugim Autor definiuje dwa rodzaje wymuszeń drogowych, jakim poddawane jest w rozprawie zawieszenie pojazdu. Jest to wymuszenie sinusoidalne oraz wyboje. Wprowadza również wskaźniki określające w sposób liczbowy skuteczność tłumienia drgań za pomocą zawieszenia półaktywnego, komfort jazdy oraz przyczepność do nawierzchni drogi.

W kolejnym rozdziale omówiono różne modele tłumika magnetoreologicznego poddanego wymuszeniu sinusoidalnemu. Zaproponowano metodę identyfikacji jego parametrów oraz przedstawiono uzyskane dla wybranych modeli wyniki identyfikacji.

W rozdziale czwartym wprowadzono model połówkowy pojazdu laboratoryjnego z zawieszeniem półaktywnym, omówiono środowisko symulacyjne oraz zaprezentowano wyniki walidacji modelu symulacyjnego dla różnych pobudzeń drogowych.

Rozdział piąty poświęcony jest syntezie i symulacyjnemu przebadaniu własności klasycznych nieadaptacyjnych algorytmów sterowania półaktywnym zawieszeniem pojazdu. Rozpatrywane są dwa literaturowe algorytmy – LQ oraz Skyhook w dwóch wersjach. Ich parametry dobierane są tak, by minimalizować unormowany wskaźnik jakości charakteryzujący komfort jazdy.

Rozdział szósty jest odpowiednikiem rozdziału piątego i przedstawia głównie zastosowanie adaptacyjnego algorytmu sterowania adaptacyjnego bazującego na idei sprzężenia w przód do sterowania półaktywnym zawieszeniem wyposażonym w tłumiki magnetoreologiczne. Rozpatrywana jest pewna modyfikacja znanego z aktywnego tłumienia hałasu algorytmu FxLMS. Jego własności zilustrowano odpowiednimi doświadczeniami symulacyjnymi. Zaproponowano również procedurę identyfikacji modelu tłumika

magnetoreologicznego w trakcie pracy algorytmu sterowania i zastosowanie tak wyznaczanego modelu w sterowaniu zawieszeniem z wykorzystaniem algorytmu Skyhook.

W rozdziale siódmym zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na pojeździe laboratoryjnym typu ATV-Sweden Allroad 500. Badane były własności dwóch różnie parametryzowanych wersji algorytmu Skyhook.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie wyników zamieszczonych w rozprawie. Do rozprawy dołączone są również trzy dodatki obejmujące specyfikację tłumika magnetoreologicznego, dane techniczne pojazdu laboratoryjnego typu ATV-Sweden Allroad 500 oraz wyprowadzenie odpowiadającego mu w pewnym sensie modelu połówkowego.

W tym miejscu należy również wspomnieć, że w rozprawie nie ma jednego miejsca, w którym znajduje się analiza aktualnego stanu wiedzy obejmującego jej tematykę. Analizę tę rozbito na wiele rozdziałów. W rozdziałach od drugiego do szóstego zamieszczono analizy odpowiednie do ich tematyki.

3. Opinia merytoryczna

Poprawność i oryginalność tezy rozprawy

Oceniana rozprawa poświęcona jest ważnemu z punktu widzenia praktycznego i zarazem aktualnemu problemowi naukowemu sterowania zawieszeniem półaktywnym wyposażonym w tłumiki magnetoreologiczne. Został on poprawnie sformułowany. Z tego sformułowania wynika teza pracy, która jest uzupełniona trzema celami dodatkowymi podsumowującymi główny zakres prowadzonych rozważań. W tym miejscu warto podkreślić, że podjęte w rozprawie zagadnienie sterowania, pomimo swojej długiej historii jest nadal trudnym i zarazem oryginalnym problemem sterowania.

Czy teza została wykazana?

Tezy rozprawy zostały wykazane. Autor rozpoczyna swoje rozważania od dyskusji wpływu drgań pojazdu na człowieka i bezpieczeństwo poruszania się pojazdem. W kolejnym krokach proponuje model tłumika magnetoreologicznego, identyfikuje jego parametry, łączy go z odpowiednim modelem pojazdu oraz dokonuje syntezy nieadaptacyjnych (algorytmy LQ i Skyhook) oraz adaptacyjnych algorytmów sterowania bezpośredniego (dwukanałowy algorytm FxLMS) oraz pośredniego (algorytm Skyhook z identyfikacją modelu tłumika magnetoreologicznego w trakcie pracy układu sterowania zawieszeniem). Ilustruje własności syntezowanych algorytmów sterowania odpowiednimi doświadczeniami symulacyjnymi. Ostatnim krokiem dowodzenia tez rozprawy jest implementacja dwóch wersji algorytmu

Skyhook w pojeździe laboratoryjnym. Moim zdaniem, z punktu widzenia kompletności rozważań, brakuje wyników badania opracowanych adaptacyjnych algorytmów sterowania w pojeździe laboratoryjnym.

Analiza źródeł i wiedza Autora w danej dyscyplinie naukowej

Bibliografia przedstawiona przez Autora rozprawy składa się ze 164 pozycji opublikowanych w okresie od 1935 do 2015 roku. Spośród tych pozycji 11 jest autorstwa lub współautorstwa doktoranta, w tym tylko dwie pozycje są samodzielnego autorstwa mgr. Krauze. Zamieszczone w rozdziałach od drugiego do szóstego przeglądy bibliograficzne świadczą o umiejętności poruszania się Autora po literaturze przedmiotu rozprawy. Świadczą one również o szerokiej wiedzy doktoranta obejmującej problematykę projektowania półaktywnych algorytmów sterowania zawieszeniem pojazdu. Pewnym niedociągnięciem w analizie aktualnego stanu wiedzy z zakresu tematyki rozprawy jest brak krytycznego odniesienia się do metod sterowania zawieszeniem półaktywnym bazujących na idei sterowania poślizgowego oraz algorytmie Groundhook.

Pozycja rozprawy na tle stanu wiedzy w literaturze

Problematyka projektowania algorytmów sterowania zawieszeniem pojazdu z wykorzystaniem jako elementów wykonawczych tłumików magnetoreologicznych jest bardzo ciekawym problemem sterowania obiektem nieliniowym, który poruszany jest w wielu publikacjach. Z punktu widzenia aktualnego stanu wiedzy zaproponowany przez Autora rozprawy algorytm sterowania zawieszeniem na bazie idei wielokanałowego algorytmu LMS oraz procedura identyfikacji modelu tłumika magnetoreologicznego w trakcie pracy układu sterowania zawieszeniem uważam za oryginalny wkład Autora do literatury przedmiotu rozprawy. Ciekawą jest również zaproponowana w rozprawie propozycja dostrajania algorytmów LQ i Skyhook poprzez przegląd przestrzeni potencjalnych nastaw. Uważam, że za oryginalne osiągnięcie rozprawy należy również uznać implementację wybranych wersji algorytmu Skyhook w systemie sterowania zawieszeniem pojazdu laboratoryjnego oraz uzyskane wyniki badania tych algorytmów.

W tym miejscu warto jeszcze nadmienić, że uzyskane w rozprawie wyniki zostały zaprezentowane w postaci jednej samodzielnej publikacji w czasopiśmie będącym na liście filadelfijskiej, pięciu doniesień konferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science (w tym jedno jest samodzielne) oraz pięciu współautorskich doniesień konferencyjnych

indeksowanych w bazie Scopus. Wszystkie publikacje Autora rozprawy są napisane w języku angielskim.

Znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej

Praca stanowi drobny krok w rozwoju metodologii projektowania algorytmów sterowania półaktywnym zawieszeniem pojazdu. Uzyskane wyniki eksperymentów symulacyjnych świadczą o potencjalnej praktycznej użyteczności zaproponowanych w rozprawie nowych adaptacyjnych algorytmów sterowania zawieszeniem pojazdu wyposażonym w tłumiki magnetoreologiczne. Jak już wspomniałem, brakuje mi w rozprawie wyników badania opracowanych adaptacyjnych algorytmów sterowania w pojeździe laboratoryjnym. Warto w tym miejscu podkreślić, że uzyskane wyniki badań symulacyjnych tych algorytmów stanowią dobrą podstawę do podjęcia dalszych prac związanych z ich implementacją w pojeździe laboratoryjnym i porównaniem jakości ich działania z algorytmami znanymi z literatury, z których jeden, Skyhook zaimplementowano już w tym pojeździe.

Umiejętność Autora przedstawiania wyników rozprawy

Od strony formalnej rozprawa została zredagowana poprawnie. Nie oceniam w niniejszej recenzji poziomu języka angielskiego w którym jest napisana. Jednak muszę stwierdzić, że pisząc rozprawę, autor nie ustrzegł się licznych usterek redakcyjnych. Moim zdaniem zasadniczym mankamentem jest brak, przed postawieniem tezy krytycznego odniesienia się do aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy. Jak już wspomniałem, odniesienie to jest rozdzielone na wiele rozdziałów. Nie ułatwia to czytania pracy.

Słabe strony rozprawy i uwagi szczegółowe

1. W spisie oznaczeń błędnie podano nazwę algorytmu LMS.
2. W spisie oznaczeń opis macierzy A_{hc}, B_{hc}, $B_{hc,F}$, $B_{hc,r}$ nie jest precyzyjny - powinno być napisane, że są to macierze modelu w postaci równań stanu.
3. Tytuł rozdziału 2.1 jest nieprecyzyjny. Moim zdaniem nie powinno być w nim słowa vibrations.
4. Strona 15: moim zdaniem brakuje definicji pojęć spatial displacement PSD oraz temporal PSD.
5. Strona 15[13]: wzór (2.1) nie jest transmitancją jak to jest napisane w rozprawie. Jest to gęstość widmowa mocy.

6. W tytule podrozdziału 2.1.2 nie powinno być słowa continuous.
7. Wzór (2.3): brakuje wyjaśnienia, czym są kolejne $A_{f,j}$ oraz $\phi_{f,j}$.
8. Strona 16[13]: zamiast $A_{f,0}$ powinno być $A_{f,1}$.
9. Tytuł rozdziału 2.2 jest nieprecyzyjny.
10. W tytule rozdziału 2.2.1 nie powinno pojawić się słowo general.
11. Strona 19: pojawiające się na tej stronie i używane w dalszej części rozprawy pojęcie vibration level nie jest zdefiniowane.
12. Wzór (2.7): wprowadzono filtr $W(z^{-1})$, który w pracy nie jest zdefiniowany i użyty.
13. Wzór (2.8) definiujący transmissibility $T_{u,y}(f)$ nie jest precyzyjny. Definicja ta nie jest w rozprawie używana. Zamiast niej używana jest definicja (2.9). Nie jest oczywistym, po co została definicja (2.8) wprowadzona? Brakuje w rozprawie informacji, jak transmissibility była liczona numerycznie np. w rozdziale 4. W tym miejscu nasuwa się pytanie, czy transmissibility może być użyta do oceny jakości tłumienia drgań przez zawieszenie pojazdu? Dodatkowo, czy warto brać pod uwagę przy wyznaczaniu jej wartości dla kolejnych częstotliwości tylko pobudzenie sinusoidalne?
14. Strona 21[10,11]: zdanie trudne do interpretacji.
15. Strona 26[12]: w tym miejscu pojawia się nieprecyzyjna nazwa linear suspension MR dumpers.
16. Rysunek 3.2: pojawia się na nim niezdefiniowany symbol f().
17. Wzór (3.1): pojawia się w nim niezdefiniowany symbol Θ_{mr}. Podobnie w linii 30[12] niezdefiniowany jest symbol Θ.
18. Rysunki (3.5) i (3.7) nie są precyzyjne i moim zdanie wprowadzają czytelnika w błąd.
19. Zależności (3.13) oraz (3.14) są trudne do interpretacji ze względu na zapis i brak definicji występujących w nich zmiennych.
20. Rysunek 4.1 symbol y jest moim zdaniem niezdefiniowany.
21. Strona 50_{12}: pojawiająca się uwaga o modelu liczbie stopni swobody jest bardzo nieprecyzyjna.
22. Tabela 4.1 i komentarz nad nią: moim zdaniem powinno w rozprawie pojawić się wyjaśnienie jak przyjęte do badań symulacyjnych parametry modelu pojazdu odnoszą się do pojazdu laboratoryjnego.
23. Strona 54: pojawiają się niezdefiniowane pojęcia synchronous oraz inverted front and rear road-induced excitations.
24. Wzory (4.7), (4.8) i (4.9) są niemożliwe do interpretacji ze względu na brak definicji pojawiających się w nich oznaczeń.

25. Rysunek 4.5: pojawiający się na tym rysunku symbol $S_{mr}(t)$ jest niezdefiniowany w treści rozprawy.
26. Na rysunku 5.2 pojawia się optimisation layer, który to w rozprawie nie jest omawiany.
27. Rysunek 5.4: na tym rysunku pojawiają się tramsissibility T_{Fmrybc}. Nie jest to poprawne. Rodzi się w tym miejscu pytanie, czy nie powinna być na tym rysunku przedstawiona odpowiednia transmitancja?
28. Rysunek 5.6: pojawia się na nim symbol ⊆. Nie jest oczywistym, jaką pełni on rolę.
29. Wzór 5.8: pojawia się symbol ⊂. Brak jest wyjaśnienia jaką pełni rolę.
30. Rozdziały 5.3, 5.3.2, 6.3, 6.3.1: występujące w tych rozdziałach słowo optimisation powinno być zastąpione moim zdaniem słowem tuning.
31. Rysunki 5.7, 5.8, 5.9: nie udało mi się znaleźć w treści rozprawy, co jest prezentowane na tych wykresach .
32. Strona 85^{8-10}: przedstawiony w tym miejscu cel sterowania zawieszeniem nie jest w rozprawie rozpatrywany.
33. Rozdział 6.2.3: w pierwszych dwóch akapitach tego rozdziału błędnie opisano algorytm LMS i FxLMS. W tym miejscu pojawia się pytanie, dlaczego w stosowanym algorymie FxLMS nie uwzględniono sprzężeń skrośnych? W rozdziale tym oraz w dalszej części rozprawy pojawia się również kolizja oznaczeń dotycząca symbolu T z różnymi indeksami – do tej pory była to transmissibility a teraz jest to transmitancja.
34. Wzory (6.3) i (6.9): zapis algorytmu adaptacji nie jest precyzyjny.
35. Rozdział 6.2.4: tytuł rozdziału i dyskusja w nim zawarta nie dotyczy, jak pisze to Autor, linearyzacji lecz aproksymacji.
36. Rozdział 6.2.5: tytuł rozdziału i dyskusja w nim zawarta nie dotyczy, jak pisze to Autor, stabilności algorytmu FxLMS. Dodatkowo na stronie 104^{6-8} nieprecyzyjnie określono cel działania algorytmu LMS.
37. Rysunek 6.13: pojawia się na nim niezdefiniowany symbol Δ.
38. Rozdział 6.4.4: nie ma w tym rozdziale opisu algorytmu ewolucyjnego jak to zapowiada jego tytuł.
39. Wzór (6.12) nie definiuje precyzyjnie wskaźnika jakości minimalizowanego podczas identyfikacji modelu tłumika magnetoreologicznego. Dodatkowo niezdefiniowany jest pojawiający się w tym wzorze symbol N.
40. Wzór (7.3) nie jest zapisany poprawnie.

41. W pracy błędnie używane są następujące słowa: continuous, controllable, noncontrollable oraz scalable.

W tym miejscu muszę podkreślić, że powyższe uwagi utrudniają czytanie rozprawy, lecz nie wpływają na jej pozytywną ocenę. Dodatkowo muszę podkreślić ogrom pracy, jaką wykonał Autor, przygotowując rozprawę.

4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania dotyczące zawartości i formy rozpraw doktorskich stawiane w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz wnioskuję o **przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej autora mgr. inż. Piotra Krauze do publicznej obrony.**

J. Figwel