

Dr hab. inż. Marek Jaśkiewicz Prof. PŚk.
Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce
m.jaskiewicz@tu.kielce.pl

Kielce 04.09.2023r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Jana Stanisława Biniwicza** zatytułowana "**Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego**".

Podstawa wykonania recenzji: Pismo Przewodniczącego RND IM PW z dnia 06 lipca 2023 roku działającego w oparciu o uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej Nr 562/II-IM/2023 z dnia 7 czerwca 2023 roku.

1. Ocena przedmiotu rozprawy - uwagi wstępne

Przedmiot opiniowanej pracy wybrano z dużą znajomością rzeczy. Tematyka poświęcona optymalizacji trajektorii ruchu wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego, którą zajął się doktorant jest bardzo istotna. Doktorant podczas pracy z zawodnikami sportu motocyklowego oraz z danymi z pokładowych układów pomiarowych zaobserwował istotną różnicę w specyfice pracy między jednoczesnym wspomaganie dwóch kierowców a pracą z wyłącznie jednym kierowcą. Analiza porównawcza danych od obu kierowców pozwalała na niemalże natychmiastową identyfikację problematycznych fragmentów trasy u każdego z nich, co owocowało szybką poprawą czasu okrążenia obydwu zawodników. W przypadku pracy z jednym kierowcą, bez dostępu do dodatkowych danych referencyjnych, proces poprawy czasu okrążenia wymagał znacznie większego wysiłku oraz dogłębnej analizy zgromadzonych danych.

Z tego punktu widzenia podjęte przez Autora ocenianej rozprawy badań numerycznych nad optymalną trajektorią wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego wydaje się zrozumiałe i w pełni uzasadnione.

Sformułowanie zadania sterowania optymalnego w przypadku quasi-statycznego ruchu płaskiego wraz z eksperymentalnie wyznaczonymi ograniczeniami na wielkości sterujące, analizę porównawczą między zaproponowanym, a prezentowanym w literaturze

Rada Naukowa Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna
Wpłynęło dnia 11.09.2023
L. dz. _____

sformułowaniem problemu sterowania optymalnego, analizę rezultatów numerycznego procesu odwzorowania geometrii przestrzennej jezdni dla różnych metod pozyskiwania danych wejściowych, analizę porównawczą z badaniami drogowymi, które zostały przeprowadzone na różnych torach wyścigowych i za pomocą motocykli różnych klas wyścigowych oraz analizę porównawczą numerycznie oszacowanych przebiegów ugięcia zawieszenia z wartościami zarejestrowanymi w trakcie ruchu pojazdu można uznać za wysoce oryginalne, a przez to bardzo istotne z naukowego punktu widzenia.

Jednym z głównych celów pracy było opracowanie metodyki badań numerycznych nad optymalną trajektorią wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. W trakcie prac badawczych zwracana była szczególna uwaga na użyteczność opracowywanych modeli (drugi cel główny), czyli możliwości prowadzenia za ich pomocą wartościowej analizy porównawczej z pomiarami zarejestrowanymi w trakcie ruchu pojazdu.

Doktorant sformułował następujące cele szczegółowe pracy:

1. sformułowanie zadania optymalnego sterowania pojazdem w warunkach ruchu quasi-statycznego, w sposób umożliwiający uwzględnienie cech dynamiki pojazdu oraz fizycznych uwarunkowań kierowcy,
2. dobranie odpowiedniej metody pozyskiwania danych wejściowych w procesie numerycznego odwzorowania geometrii jezdni,
3. implementacja zaproponowanych zmian w uogólnionym do ruchu przestrzennego zadaniu optymalizacji,
4. propozycja numerycznej metody szacowania ugięcia elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu jednośladowego na podstawie informacji o jego prędkości początkowej i przyspieszeniu.

Cele te nawiązują do wspomnianego problemu optymalizacji trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. Uważam, że cele te zostały poprawnie sformułowane i w pełni odpowiadają ustawowym i zwyczajowym wymaganiom, jakie stawiane są rozprawom doktorskim.

Na podstawie powyższych celów Doktorant sformułował tezy swojej pracy:

1. Uwzględnienie odpowiednich danych eksperymentalnych w sformułowaniu problemu minimalizacji czasu przejazdu wyścigowego pojazdu jednośladowego w warunkach ruchu quasi-statycznego umożliwia wyznaczenie optymalnej trajektorii oraz przebiegu manewrów zgodnych z obserwacjami doświadczalnymi.
2. Model drgań o trzech stopniach swobody wykorzystujący zarejestrowane eksperymentalnie informacje o przyspieszeniach pojazdu umożliwia wierne odwzorowanie przebiegów ugięcia elementów sprężystych w zawieszeniu wyścigowego pojazdu jednośladowego.

Z przyjemnością mogę stwierdzić, że tezy są dobrze sformułowane, a ich dowód może stanowić podstawę do nadania stopnia naukowego, są więc one dysertabilne.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że podjęty przez mgr. inż. Jana Biniewicza temat jest tematem interesującym naukowo, odpowiadającym wymaganiom, jakie stawiane są pracom aspirującym do tego, by być rozprawami na stopień doktora nauk technicznych. Tezy pracy sformułowane są w taki sposób, że możliwa jest ich naukowa weryfikacja, co ma miejsce w dalszej części pracy. W związku z powyższym stwierdzam, że wybrany temat i tezy ocenianej rozprawy oceniam zdecydowanie pozytywnie.

2. Charakterystyka i rozważania dotyczące rozprawy

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Jan Biniewicz podjął próbę analizy optymalnego ruchu pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. W tym celu przeprowadził szerokie studia literaturowe, wykonał szereg badań własnych oraz dokonał analizy wyników tych badań.

Rozprawa doktorska pt. "Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego" została napisana w języku polskim na 215 stronach. Spis pozycji literatury zawiera 73 pozycje (z czego 2 jest współautorstwa Doktoranta). Ze spisu można było wyodrębnić osobno strony internetowe. Rozprawa zawiera streszczenie zarówno w języku angielskim jak i polskim. Rozprawa zawiera również wykaz najważniejszych oznaczeń oraz załączniki. Praca zawiera siedem rozdziałów oraz podsumowanie i wnioski.

Rozdział 1 (5 stron) zawiera krótką informację odnośnie ruchu pojazdów kołowych. Ponadto zawiera wprowadzenie do problemu badawczego. Zawiera również motywacje, cele pracy, zakres badań oraz sformułowane przez autora tezy pracy. Doktorant przyjął cztery cele pracy, przedstawił zakres badań oraz sformułował dwie tezy pracy.

Rozdział 2 (9 stron) zawiera przegląd literaturowy dotyczący problemu minimalizacji czasu przejazdu oraz warunków ruchu quasi-statycznego. Wyszczególniono w nim między innymi zagadnienia minimalizacji czasu okrążenia poprzez następujące dwa podejścia: poszukiwanie minimalnego czasu manewru dla znanej, predefiniowanej trajektorii (historycznie pierwsze stosowane podejście) oraz wyznaczanie nieznannej trajektorii pojazdu w trakcie rozwiązywania problemu minimalizacji czasu manewru. Warunki ruchu quasi-statycznego powiązane są z diagramami przyspieszeń g-g, czyli wykresami przedstawiającymi obwiednię dopuszczalnych przyspieszeń pojazdu. Diagram g-g pozwala na scharakteryzowanie osiągow układu pojazd-kierowca. Może być także wykorzystany do oceny wpływu zmian podstawowych charakterystyk pojazdu na poddawane analizie limity przyspieszeń. Diagramy g-g są również popularnym narzędziem stosowanym do oceny kierowców pod względem wykorzystywania potencjału pojazdu oraz dostępnej przyczepności opon. Rozdział ten jest poprawnie opisany.

Rozdział 3 (15 stron) zawiera charakterystykę sterowania optymalnego. Doktorant przedstawia w tym rozdziale teorię sterowania optymalnego jest wynikiem rozwinięcia rachunku wariacyjnego. W rozdziale tym scharakteryzowano sformułowanie problemu

sterowania optymalnego za pomocą pięciu zagadnień: zadanie sterowania optymalnego bez ograniczeń – podejście wariacyjne, zadanie sterowania optymalnego bez ograniczeń z czasem swobodnym, zadanie sterowania optymalnego z ograniczeniami, sterowanie „bang-bang” oraz sterowanie osobliwe. Ponadto przedstawiono również numeryczne metody rozwiązywania zadań sterowania optymalnego oraz oprogramowanie GPOPS-II będące zewnętrznym narzędziem rozszerzającym funkcjonalność oprogramowania MATLAB. W rozdziale tym występuje dużo wzorów, które w większości nie mają odniesienia w tekście.

Rozdział 4 (32 strony) zawiera szeroki opis zadania minimalizacji czasu manewru. Przedstawiona została analiza wpływu zaproponowanych zmian w sformułowaniu ZSO na otrzymywane rezultaty obliczeń. Pojazd sterowano zrywami (pochodnymi przyspieszenia), których wartości dopuszczalne ograniczono hiperbolicznymi funkcjami zależnymi od prędkości ruchu. Ograniczenia wyznaczono na podstawie zbiorów danych, które zawierały zarejestrowane eksperymentalnie wartości pochodnych przyspieszenia wzdłużnego oraz poprzecznego. Uzyskano satysfakcjonującą zgodność trajektorii zmiennych stanu z ich rzeczywistymi odpowiednikami. Przeprowadzona na podstawie obliczeń numerycznych analiza jazdy kierowcy testowego pozwoliła na poprawę czasu okrążenia w rzeczywistych warunkach ruchu. Wprowadzone zmiany w sposobie pokonywania trasy dotyczyły aspektów: rozpoczęcia faz hamowania oraz przyspieszania, prędkości realizacji manewrów w przejściowych fazach ruchu, jak również modyfikacji obieranej trajektorii przejazdu. Metoda ta może zostać ponadto wykorzystana jako narzędzie wspierające proces projektowania obiektów wyścigowych lub wytyczania tras zawodów. Wszystkie istotne aspekty z punktu widzenia projektowania i bezpieczeństwa użytkownika toru wyścigowego, takie jak: wymiary żwirowych pułapek zwalniających, odległości barier energochłonnych od krawędzi toru, położenie oraz wymiary dodatkowych krawężników i wybiegów asfaltowych wymagają wiarygodnej informacji o prędkościach i trajektoriach ruchu pojazdów mających użytkować dany tor.

Rozdział 5 (24 strony) zawiera numeryczne odwzorowanie trójwymiarowej jezdni wykonane przez Doktoranta. Przedstawiono w nim problem numerycznego odwzorowania geometrii jezdni opisanej jako znana z geometrii różniczkowej powierzchnia zorientowana. Główną część rozdziału poświęcono analizie dostępnych metod pozyskiwania danych wejściowych do sformułowanego we wstępie zadania optymalizacji. Opisano metody niewymagające stosowania specjalistycznego sprzętu pomiarowego ani prowadzenia kosztownych prac pomiarowych na odwzorowywanym obiekcie. Rozpatrzono dostępne w sieci bazy danych wysokościowych (numeryczne modele terenu) oraz poruszono zagadnienie pomiaru wysokości elipsoidalnej za pomocą typowego odbiornika sygnału satelitarnego wykorzystywanego w pokładowych systemach akwizycji danych w pojazdach wyścigowych.

W rozdziale tym Dyplomant nie ustrzegł się błędów redakcyjnych. Przykładem mogą być opisy osi raz występuje symbol raz pełna nazwa. Ponadto nie wszystkie wzory mają odniesienie w tekście.

Rozdział 6 (49 strony) zawiera zadanie minimalizacji czasu manewru w ruchu po jezdni 3D.

Na podstawie badań i analiz doktorant zaproponował modyfikacje w sformułowaniu ZSO w warunkach ruchu quasi-statycznego, polegające na uwzględnieniu:

- charakterystyki trakcyjnej,
- półempirycznego diagramu przyspieszeń g-g-g,
- uzależnionego od prędkości ruchu zbioru wartości dopuszczalnych zrywów,

które pozwoliły na uzyskanie rezultatów numerycznych o wysokiej zgodności z pomiarami zarejestrowanymi w trakcie ruchu rzeczywistego pojazdu. Sformułowane ZSO może znaleźć zastosowanie jako narzędzie wspomagające proces analizy danych. Możliwe było wskazanie fragmentów trasy, w których układ motocykl-kierowca dysponuje potencjałem na poprawę czasu, a także fragmentów, w których geometria jezdni umożliwia uzyskanie większych wartości przyspieszeń. Pomimo stosunkowo prostego modelu pojazdu możliwe było wskazanie obszarów toru o wysokim prawdopodobieństwie utraty kontaktu koła z jezdnią, co potwierdzono za pomocą pomiarów ugięcia zawieszenia oraz prędkości kół.

Sformułowane zadania: poszukiwania optymalnej trajektorii ruchu oraz numerycznego odwzorowania jezdni stanowią dodatkowe źródło informacji wspomagające proces zrozumienia i interpretacji pomiarów rejestrowanych w trakcie ruchu rzeczywistego pojazdu. Mogą być z powodzeniem traktowane jako wartościowy punkt odniesienia w analizie porównawczej, w szczególności, gdy nie są dostępne żadne inne dane referencyjne.

Rozdział 7 (31 stron) zawiera analizę geometrii pojazdu w czasie ruchu. W rozdziale tym doktorant podjął próbę odpowiedzi na pytanie, czy w oparciu o rezultaty z ZSO możliwe jest wyciągnięcie wniosków na temat ustawień pojazdu.

Analiza porównawcza z eksperymentem wykazała bardzo dobrą zgodność rezultatów, pomimo, że skomplikowany trójwymiarowy ruch pojazdu został zredukowany do ruchu płaskiego. Wykazano, że model jezdni w znaczący sposób wpływa na otrzymywane za pomocą modelu numerycznego rezultaty, w szczególności na trasach charakteryzujących się zmianami pochylenia podłużnego jezdni (niezerowa krzywizna normalna).

Zaproponowany model drgań spełnia sformułowane na początku rozdziału oczekiwania. Pozwala na weryfikację ugięć elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu jednośladowego na podstawie znajomości jego przyspieszeń - z ZSO lub zarejestrowanych w trakcie badań drogowych. Powinien również umożliwić skrócenie czasu poszukiwania odpowiednich ustawień pojazdu, dzięki zastosowaniu numerycznej weryfikacji różnych konfiguracji wprowadzanych zmian. Może zostać również rozważony jako narzędzie rozszerzające możliwości układów pomiarowych, których działanie oparte jest wyłącznie o pomiary satelitarne.

Podsumowanie i wnioski (4 strony) zawiera podsumowanie i wnioski z wykonanych badań. W trakcie prowadzonych prac badawczych szczególną uwagę zwracano na aplikacyjny aspekt rozważanego zagadnienia oraz możliwość wykorzystania otrzymywanych numerycznie wyników w późniejszej pracy z kierowcą wyścigowym lub podczas prac poświęconych

rozwojowi i udoskonalaniu wyścigowego pojazdu jednośladowego. Z punktu widzenia możliwości użytkowania narzędzi numerycznych w warunkach pracy na torze wyścigowym istotny jest czas trwania obliczeń. Z tego też względu analizie poddano problem sterowania optymalnym pojazdem w warunkach ruchu quasi-statycznego, który ze względu na zwięzły opis dynamiki sterowanego układu przedstawiany jest w literaturze jako mało złożony obliczeniowo. Cechą charakterystyczną przyjętego podejścia jest również jego uniwersalność wynikająca z opisu obwiedni osiągow pojazdu za pomocą diagramów przyspieszeń (diagramów g-g). Dla tego samego układu równań stanu możliwa jest zarówno analiza ruchu samochodu, jak i motocykla. Zmianie ulega jedynie kształt obwiedni diagramu przyspieszeń.

Należy również podkreślić, że zastosowanie własnego oryginalnego podejścia w którym stałą wartość dopuszczalną zmiennych sterujących zastąpiono zbiorem ograniczonym od góry oraz od dołu hiperbolicznymi funkcjami zależnymi od prędkości ruchu. Ograniczenia wyznaczono na podstawie zbiorów danych eksperymentalnych, które zawierały informacje o rejestrowanych w trakcie ruchu rzeczywistego pojazdu zrywach. Zastosowane podejście pozwoliło uwzględnić istotne cechy dynamiki pojazdu wpływające na zmienność przyspieszeń, jak również uwzględnić skończoną wartość momentu przykładanego do kierownicy powiązaną z fizycznymi uwarunkowaniami człowieka. Za pomocą licznych przykładów obliczeniowych wykazano, że zaproponowane zmiany w sformułowaniu problemu pozwalają uzyskać wysoką zgodność zmian przyspieszeń w całym zakresie osiąganych przez pojazd prędkości.

Sprzęgnięcie zaproponowanych modeli ze stworzoną aplikacją wspomagającą proces zarządzania geometrią jednośladow pozwala traktować cały przedstawiony proces obliczeniowy jako wartościowe, dodatkowe źródło informacji w analizie ruchu motocykli.

3. Uwagi dyskusyjne

1. Czy badania, które były prowadzone między innymi w rozdziale 4 były prowadzone na większej liczbie pojazdów? Czy do tych badań był wykorzystywany tylko jeden rodzaj pojazdu?
2. Czy prace wykonane w rozdziale 5 były jeszcze powtórzone na innym torze, innej nawierzchni?
3. Czy doktorant mógłby wskazać takie 3 najważniejsze aspekty swojej pracy (oryginalny dorobek naukowy Doktoranta)?

4. Wniosek Końcowy

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jana Biniewicza pt. " Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego " podejmuje istotne problemy poznawcze o znacznym potencjale aplikacyjnym i została wykonana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. Przyjęte przez Doktoranta tezy rozprawy zostały udowodnione a wyznaczony cel konsekwentnie osiągnięty.

Uwagi zawarte w mojej recenzji mają charakter redakcyjny i nie wpływają na poziom opiniowanej pracy.

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy **mgr. inż. Jana Biniewicza** pt. "**Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego**" jestem przekonany, że spełnione zostały wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) w brzmieniu po wejściu w życie ustawy z dnia 23 czerwca 2016 roku o zmianie ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym oraz niektórych innych ustaw.

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie opracowania przedstawionego do recenzji jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę użyteczne walory i olbrzymi wkład pracy Autora recenzowanej rozprawy wnioskuję do Komisji Doktorskiej o wyróżnienie pracy.



