

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Jana Stanisława Biniewicza

Optymalizacja trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego

**wykonanej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Warszawskiej
promotor prof. dr inż. Mateusz Pyrz**

1 Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest praca wykonana przez mgr inż. Jana Stanisława Biniewicza dotycząca optymalizacji trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. W pracy analizowano zagadnienie optymalizacji trajektorii ruchu wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego.

Opracowano model ruchu motocykla uwzględniający dane eksperymentalne, zawierający propozycję półempirycznej obwiedni diagramu osiągow pojazdu oraz analizę procedury numerycznego odwzorowania przestrzennej geometrii jezdni. Rozważane w pracy problemy optymalizacji sformułowane zostały jako zadania sterowania optymalnego, które rozwiązywano za pomocą zewnętrznych procedur optymalizacyjnych do programu MATLAB. W oparciu o te procedury wyznaczono optymalne trajektorie ruchu, motocykli różnych klas wyścigowych, poruszających się po zróżnicowanych płaskich oraz przestrzennych torach wyścigowych. Wyznaczono optymalne trajektorie ruchu dla różnych wariantów manewrów. Na podstawie analizy przyspieszeń wzdłużnych i poprzecznych oszacowano ugięcia elementów sprężystych zawiesznień. Wybrane wyniki symulacji numerycznych porównano z danymi zarejestrowanymi eksperymentalnie uzyskując dobrą zgodność.

Praca obejmuje 8 głównych rozdziałów i trzy załączniki o łącznej objętości 215 stron, 13 tabele i 125 rysunków oraz wykaz oznaczeń. Wykaz literatury zawiera 73 prace w większości opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych.

2 Ocena merytoryczna

2.1 Ocena ogólna

Badania, które podjął doktorant mają zarówno walor poznawczy jak i walor praktyczny. Celem pracy była optymalizacja trajektorii ruchu wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. Zbudowano do tego celu model motocykla i analizowano ruch w granicach obwiedni diagramu osiągow pojazdu. Wykorzystano procedury optymalizacyjne systemu MATLAB. Celem użytkowym było uzyskanie zoptymalizowanych trajektorii ruchu motocykli dla określonych torów wyścigowych.

Autor postawił dwie tezy 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 eksperymentalne informacje o przyspieszeniach pojazdu umożliwia wierne odwzorowanie przebiegów ugięcia elementów sprężystych w zawieszeniu wyścigowego pojazdu jednośladowego.

Postawione tezy zostały udowodnione poprzez przeprowadzenie optymalizacji trajektorii ruchu pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego. Do działań optymalizacyjnych wykorzystano system MATLAB. W tego typu obliczeniach problemem są zawsze ograniczenia i zmienne sterujące. Doktorant wykorzystał zrywy (pochodne przyspieszeń) jako podstawowe dane do analiz oraz wykorzystał dane pomiarowe do wyznaczania granicznych ich wartości. Pozwoliło to na otrzymanie wyników zbliżonych do danych uzyskanych z pomiarów. Uzyskane wyniki dobrze oddawały trajektorię ruchu pojazdu na torach płaskich. Kolejnym krokiem, który zaproponował autor pracy było uwzględnienie przechyłów wzdłużnych i poprzecznych toru podczas jazdy motocykla po torze. W tej części pracy doktorant określił możliwości uzyskania danych wysokościowych tras motocykli oraz przedstawił sposób ich przygotowania do analiz. Uwzględnienie w obliczeniach pochylenia terenu pozwoliło na znacznie wierniejsze ustalenie trajektorii i parametrów ruchu motocykla. W końcowej części pracy doktorant zaproponował wykorzystanie modelu motocykla jako układu drgającego do określenia parametrów jego zawiesznień.

W załącznikach autor pracy zamieścił opis jedni w geometrii różniczkowej, aplikację pozwalającą na ocenę zmian „geometrii” motocykla i charakterystyk zawiesznień oraz weryfikację modelu drgań motocykla.

2.2 Ocena szczegółowa

Rozprawa ma układ pracy badawczej, obejmuje 9 podstawowych części: „Wprowadzenie” (1) zawierające „Motywację”, „Cel i zakres pracy” oraz „Tezy pracy”,

„Przegląd literatury” (2), „Sterowanie optymalne” (3), „Zadanie minimalizacji czasu manewru” (4), „Numeryczne odwzorowanie trójwymiarowej jezdni” (5), „Zadanie minimalizacji czasu manewru po jezdni 3D” (6), „Analiza geometrii pojazdu podczas ruchu” (7), „Podsumowanie” (8), „Załączniki” (9) A – opis jezdni w geometrii różniczkowej, B – Aplikacja do zarządzania geometrią motocykla, C – Weryfikacja modelu drgań na drodze obliczeń analitycznych. Ponadto praca zawiera wykaz oznaczeń” i streszczenia w języku polskim i angielskim.

Wprowadzenie (1)

We wstępie przedstawiono problem analizy ruchu jednośladowych pojazdów wyścigowych, poprzez ocenę osiągow takiego pojazdu. Ocena tych pojazdów zazwyczaj ogranicza się do czasu w jakim dany pojazd jest w stanie pokonać jedno okrążenie toru wyścigowego oraz w jaku sposób prowadzić poszczególne manewry na torze by ten czas został osiągnięty. Od lat 50 ubiegłego wieku są prowadzone analizy dotyczące określania prędkości i jej zmian w poszczególnych miejscach toru. W latach 70 zaprezentowano wykresy przyspieszeń tego typu pojazdów w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym, nazywane diagramami g-g. Były one wykorzystywane w analizach optymalizacyjnych ruchu pojazdów wyścigowych. Autor korzystając z tych diagramów i własnych doświadczeń oraz wyników pomiarów starał się określić optymalną trajektorię ruchu dla motocykla.

Motywacja (1.1)

Doktorant interesuje się sportem motorowym a jego zainteresowania zostały pogłębione podczas wcześniejszych prac badawczych związanych w konstruowaniu i współpracą z zawodnikami sportów motorowych. Impulsem do działania była publikacja autorów M. Veneri i M. Massaro dotycząca minimalizacji czasu okrążenia motocykli wyścigowych poprzez określenie ich trajektorii ruchu.

Cel i zakres pracy (1.2)

Głównym celem pracy było opracowanie metodyki badań numerycznych pozwalającej na optymalizację trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach quasi-statycznych. Walidacja opracowanej metodyki opierała się na porównaniu uzyskanych wyników z analiz numerycznych z wynikami pomiarów zarejestrowanych podczas ruchu motocykla. Autor opisał cele szczegółowe konieczne do realizacji celu głównego.

- sformułowanie zadania optymalnego sterowania pojazdem w warunkach ruchu quasi-statycznego, w sposób umożliwiający uwzględnienie cech dynamiki pojazdu oraz fizycznych uwarunkowań kierowcy,
- dobranie odpowiedniej metody pozyskiwania danych wejściowych w procesie numerycznego odwzorowania geometrii jezdni,
- implementacja zaproponowanych zmian w zadaniu optymalizacji uogólnionym do ruchu przestrzennego,

- propozycja numerycznej metody szacowania ugięcia elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu jednośladowego na podstawie informacji o jego prędkości i przyspieszeniu.

W tym rozdziale autor przedstawił kolejne kroki działania potrzebne do realizacji celu.

Są to:

- sformułowanie zadania sterowania optymalnego w przypadku quasi-statycznego ruchu płaskiego wraz z eksperymentalnie wyznaczonymi ograniczeniami na wielkości sterujące,
- propozycję półempirycznego diagramu przyspieszeń g-g dla układu motocykl-kierowca,
- analizę porównawczą między zaproponowanym, a prezentowanym w literaturze sformułowaniem problemu sterowania optymalnego,
- przedstawienie stosownych wyprowadzeń pozwalających na uogólnienie rozważanego problemu do ruchu przestrzennego,
- analizę rezultatów numerycznego procesu odwzorowania geometrii przestrzennej jezdni dla różnych metod pozyskiwania danych wejściowych,
- analizę porównawczą między optymalnym ruchem pojazdu po jezdni 2D i 3D,
- analizę porównawczą z badaniami drogowymi, które zostały przeprowadzone na różnych torach wyścigowych i za pomocą motocykli różnych klas wyścigowych,
- przedstawienie matematycznego opisu modelu pojazdu jednośladowego o trzech stopniach swobody zbudowanego celem oszacowania ugięcia zawieszenia na podstawie przyspieszeń pojazdu,
- analizę porównawczą numerycznie oszacowanych przebiegów ugięcia zawieszenia z wartościami zarejestrowanymi w trakcie ruchu pojazdu.

Tezy pracy (1.3)

W części pierwszego rozdziału autor zamieścił tezy pracy (zamieszczono powyżej). Tezy pracy została określona w sposób jasny i klarowny.

„Przegląd literatury” (2)

Rozdział ten został podzielony na dwie części. Pierwsza z nich dotyczy przeglądu literatury dotyczącego minimalizacji czasu przejazdu a druga diagramu przyspieszeń g-g.

Problem minimalizacji czasu jednego okrążenia był analizowany w różny sposób z wykorzystaniem różnych modeli numerycznych pojazdu. Modeli dynamiki ruchu pojazdu oraz modele analizujące ruch quasi-statyczny. W pracach analizowano poszukiwanie minimalnego czasu wykonania danego manewru, lub wyznaczenie trajektorii pojazdu przy której czas wykonania manewru jest minimalny. Minimalizacja czasu pokonania wyznaczonej trasy wykorzystuje zależności zawarte w oprogramowaniu OptimumLap firmy OptimumG jest zamieszczona w przywołanej literaturze. W dalszej części opisano poszczególne prace różnych autorów przedstawiające maksymalizację przebytej drogi, optymalizację doboru przełożeń, optymalizację kąta skrętu kierowniczy. Poszczególni autorzy zaczęli wykorzystywać model opony w tym model Pacejki. W pracach analizowano ruch płaski i ruch po jezdni w układzie trójwymiarowym.

W drugiej części przeglądu literatury zajęto się diagramem przyspieszeń g-g. Przedstawia on na wykresie graniczne wartości przyspieszeń wzdłużnych i poprzecznych wynikającą z danych charakterystycznych i osiągow motocykla (masy i momenty bezwładności, maksymalne przyspieszenia, rozkład mas podczas przyspieszania i hamowania), oporów aerodynamicznych i przyczepności opon.

Autor w opisie diagramu zapisał moc silnika jako parametr wpływający na przyspieszenie wzdłużne pojazdu. W rzeczywistości o przyspieszeniach decyduje moment silnika oraz przełożenia w układzie przeniesienia napędu.

Sterowanie optymalne (3)

W trzecim rozdziale pracy autor przedstawił teorie wykorzystywane do metod sterowania optymalnego. Następnie przedstawił sformułowania problemu sterowania optymalnego bez ograniczeń i z ograniczeniami oraz sterowanie „bing-bang”. Następnie zostały opisane metody rozwiązań zadań sterowania optymalnego: metody pośrednie, sekwencyjne i równoczesne. Do rozwiązania zagadnień sterowania optymalnego wykorzystano procedurę GPOPS-II z systemu MATLAB. W dalszej części rozdziału opisano kroki postępowania zgodnie z tą procedurą. Sformułowanie zadania sterowania optymalnego wymaga zdefiniowania funkcji: funkcji punktu końcowego oraz funkcji ciągłej. W dalszej kolejności zdefiniować należy: warunki brzegowe każdej fazy zadania, warunki na granicy faz, a także podać górną oraz dolną wartość przedziału wartości dopuszczalnych zmiennych stanu, zmiennych sterujących i ograniczeń algebraicznych. Wymagane jest również podanie początkowego przybliżenia sterowania oraz trajektorii stanu.

Opisy wykresów słabo czytelne.

Zadanie minimalizacji czasu manewru (4)

W kolejnym rozdziale pracy autor formułuje zadanie minimalizacji czasu manewru w warunkach ruchu quasi-statycznego traktując pojazd jako punkt materialny a jego ruch opisano za pomocą diagramów g-g. Rozpatrywano ruch płaski pojazdu. Do opisu ruchu motocykla wykorzystano układ równań opisany jest za pomocą pięcioelementowego wektora zmiennych stanu oraz jako zmienne sterujące wykorzystane zostały: pochodna przyspieszenia wzdłużnego (zryw wzdłużny $\dot{a}_x$) oraz pochodna przyspieszenia poprzecznego (zryw poprzeczny $\dot{a}_y$).

Ograniczenia algebraiczne wynikają z diagramu przyspieszeń g-g. Dane eksperymentalne wykorzystano do opisu funkcji zrywu poprzecznego. Z badań eksperymentalnych wynikało, że z wystarczającą dokładnością obwiednię zrywu

poprzedniego dało się opisać za pomocą linii prostej. Podobnie postąpiono w przypadku zrywu wzdłużnego.

Kolejnym etapem analiz był opis trasy ruchu motocykla. Do opisu trasy konieczna była znajomość krzywej szkieletowej toru oraz jego szerokości. Trasy manewrów potraktowane zostały jako zbiory segmentów: łuków i prostych, o znanej długości linii środkowej, stałej krzywiznie oraz szerokości.

W dalszej części rozdziału przedstawiono model pojazdu. W przyjętym quasi-statycznym modelu pojazdu pominięto: przyspieszenie kątowe pojazdu, kąty znoszenia oraz bezwładność elementów znajdujących się w ruchu obrotowym. Założono również stałą wartość przyspieszenia wzdłużnego i poprzecznego oraz przyjęto, że zawieszenie pojazdu jest sztywne, kąt skrętu kierownicy równy jest zeru, opony są dyskami o nieskończonej grubości, zaś współczynniki przyczepności opon w kierunku wzdłużnym i poprzecznym są identyczne dla przedniej i tylnej opony. Te założenia pozwoliły na określenie sił i momentów działających na motocykl a stąd na przyspieszenia / opóźnienia podczas ruchu pojazdu. Uwzględniono również przypadki oderwania przedniego koła od jedni podczas rozpędzania i tylnego koła podczas hamowania. Przeanalizowano również możliwość hamowania hamulcami jednej lub obu osi. Takie podejście pozwoliło na wyznaczenie diagramu g-g dla analizowanego motocykla. Wyznaczone na diagramie wartości przyspieszeń zostały porównane z wynikami pomiarów przyspieszeń dla motocykli klasy Supersport 300 oraz motocykla PitBike.

Końcowa część rozdziału zawiera przykłady obliczeniowe w których były analizowane trajektoria ruchu, prędkości jazdy, przyspieszenia wzdłużne i poprzeczne oraz sposób hamowania. W końcowej części podrozdziału porównano wyniki analiz numerycznych z badaniami drogowymi. Uzyskano dobrą zgodność symulacji z badaniami drogowymi.

W podsumowaniu zaproponowanej metody zapisano, że zaproponowana metodyka ułatwia wygodny opis geometrii jezdni (budowa segmentowa), zawiera niewielką liczbę wielkości potrzebnych do budowy modelu pojazdu, a charakteryzuje się krótkim czasem rozwiązania pojedynczego zadania optymalizacji.

Przyjęte założenia upraszczające, znacznie upraszczają obliczenia, i w przypadku konieczności szybkiego uzyskania wyników są uzasadnione. Jednakże podczas analizy poszczególnych manewrów może to powodować wystąpienie lokalnie błędów oszacowania prędkości jazdy.

Rys 4.17 nieczytelny

Numeryczne odwzorowanie trójwymiarowej jezdni (5)

W rozdziale piątym autor zwrócił uwagę na to, że większość torów wyścigowych charakteryzuje się pochyleniem podłużnym i poprzecznym. Stąd konieczność wprowadzenia do analiz ruchu pojazdu po torach innych niż płaski, danych torów o pochyleniach wzdłużnych i poprzecznych. Proces numerycznego odwzorowania geometrii trasy polegał na sformułowaniu zadania optymalizacji, za pomocą którego pozyskiwane są informacje o charakterystykach jezdni: krzywiznach oraz pochyleniach. Geometria trasy odwzorowywana jest na podstawie informacji punktów położonych na krawędziach trasy w układzie kartezjańskim. Wielkościami wejściowymi w procesie numerycznego odwzorowania jezdni były zbiory opisujące topologię toru w sposób dyskretny. Dane uzyskiwane były kilkoma metodami. Problemem było to, że podczas poszukiwania optymalnej trajektorii ruchu wymagany był gładki jego przebieg. Stąd proces numerycznego odwzorowania jezdni został przeprowadzony jako zadanie optymalizacyjne.

Przygotowanie danych wejściowych do procesu optymalizacji wymagało uzyskania równej liczby punktów na obydwu krawędziach jezdni oraz punkty te powinny się znajdować na prostej prostopadłej do krzywej szkieletowej toru. Do analiz wykorzystano zbiory danych dostępne w sieci nazywane numerycznymi modelami terenu. Wykorzystano dane tzw. globalne wykorzystując portal GPS Visualizer. Oprócz globalnych numerycznych modeli terenu w sieci są dostępne modele terenu o zasięgu lokalnym (np. dla Polski Geoportal). Pliki te zostały wykorzystane podczas tworzenia trasy toru w Polsce (Koszalin) oraz Katalonii. Pliki wczytywano do systemu MATLAB. W pracy zamieszczono dane z procesu optymalizacji dla toru w Koszalinie, pokazując na rysunkach pochylenia wzdłużne i poprzeczne oraz błąd odwzorowania toru.

W końcowej części rozdziału pokazano możliwość uzyskiwania danych wysokościowych z systemów GPS, lecz te charakteryzowały się dużym błędem.

Rezultaty obliczeń otrzymane z wykorzystaniem pomocy szczegółowego (lokalnego) numerycznego modelu terenu są wizualnie zgodne z rzeczywistością i zostały wykorzystane w dalszych analizach pozwalając na odwzorowanie ruchu pojazdu po przestrzennej jezdni, z wystarczającą dokładnością.

Opisy rysunków nieczytelne. Brak opisu zmiennych w równaniach 5.9-5.15

Zadanie minimalizacji czasu manewru po jezdni 3D (6)

W rozdziale szóstym autor przedstawia poszukiwania optymalnej trajektorii ruchu (przy minimalizacji czasu manewru) po trójwymiarowej jezdni. Wykorzystano identyczny zestaw zmiennych stanu jak w rozdziale 4 - prędkości stycznej do trajektorii ruchu, odległości pojazdu od krzywej szkieletowej mierzonej w płaszczyźnie jezdni oraz kąta między wektorem prędkości a styczną do krzywej szkieletowej. Wykorzystano tą samą metodę optymalizacji co

w rozdziale 4 uwzględniając pochylenie toru, a to wpłynęło na zmianę przebiegu diagramu g-g wynikającą z pochylenia toru.

W dalszej części rozdziału przedstawiono przykłady obliczeniowe, na początku obliczenia testowe dla torów o kształcie stożka ściętego i zjazd z góry i wjazd pod górę w porównaniu z torem płaskim. Każdy z przypadków obliczeniowych był analizowany. Następnie zamieszczono modele przejazdu po torze dwu i trójwymiarowym dla różnych wariantów kształtu toru wraz z ich porównaniem. W piątym podrozdziale zamieszczono porównanie wyników z analizy numerycznej z wynikami pomiarów. Wyniki pochodziły z toru Road Atlanta. W obliczeniach wykorzystano model motocykla Yamaha R6. Uzyskano wystarczającą zgodność wyników symulacji z pomiarami rzeczywistymi.

Autor uznał, że zaproponowane w niniejszej pracy modyfikacje w sformułowaniu zadania sterowania optymalnego w warunkach ruchu quasi-statycznego, polegające na uwzględnieniu:

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

pozwoły na uzyskanie rezultatów numerycznych o wysokiej zgodności z pomiarami zarejestrowanymi w trakcie ruchu rzeczywistego pojazdu.

Pomimo uproszczenia pojazdu do punktu materialnego, ograniczenia wprowadzone na wartości dopuszczalne zrywów pozwoliły na uwzględnienie cech wynikających z dynamiki układu oraz fizycznych uwarunkowań kierowcy.

Analiza geometrii pojazdu w czasie ruchu (7)

W siódmym rozdziale autor podjął próbę odpowiedzi na pytanie, czy w oparciu o uzyskane rezultaty obliczeń optymalizacyjnych możliwe jest wyciągnięcie wniosków dotyczących doboru charakterystyk elementów sprężysto-tłumiących zawieszek pojazdu oraz modyfikacji geometrii motocykla. Do analiz wykorzystano model o 4 masach, w którym masa pierwsza to masa motocykla bez zawieszek z kierowcą, druga to masa wahacza tylnego zawieszenia wraz z przeniesieniem napędu, trzecia to masa tylnego koła a czwarta koła przedniego wraz z zawieszeniem. W modelu założono dwa elementy sprężysto-tłumiące symulujące zawieszenie tylnego i przedniego koła. Na poszczególne ciała działają siły ciężkości, odśrodkowe, aerodynamiczne, siła napędowa (w łańcuchu) i siły wzdłużne. Siły te określano na podstawie przyspieszeń motocykla. Przyjęto nieliniowe charakterystyki elementów sprężysto-tłumiących. W obliczeniach autor przyjął uproszczenia:

- pominięto opór bezwładności brył będących w ruchu obrotowym,
- pominięto siłę nośną motocykla,
- pominięto „hamowanie silnikiem” - ujemną wartość momentu napędowego silnika przy zamkniętej przepustnicy.

Jako przykład obliczeniowy doktorant zamieścił przejazd po torze Poznań motocyklem Yamaha R6.

Zaproponowany model drgań pozwala na weryfikację ugięć elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu jednośladowego na podstawie znajomości jego przyspieszeń uzyskanych z symulacji lub zarejestrowanych w trakcie badań drogowych.

Nie przedstawiono w tekście co oznacza zmiana geometrii motocykla.

Przyjęte założenia upraszczające, szczególnie traktowanie kierowcy jako elementu nieruchomego względem głównej części motocykla (rozpatrywanie motocykla i kierowcy jako jedno ciało), może powodować występowanie błędów obliczeniowych, wiedząc, że kierowca podczas wykonywania manewrów skrętu zazwyczaj zmienia swoją pozycję zmniejszając pochylenie motocykla. Stąd wykorzystanie danych dotyczących przyspieszeń może generować błąd.

Wnioski (8)

W rozdziale ósmym stwierdzono osiągnięcie zamierzonych celów pracy. Przeprowadzone analizy numeryczne oraz wykorzystanie danych pomiarowych, pozwoliło na uzyskanie wymaganej dokładności obliczeń. W drugiej części pracy wykorzystano model drgań motocykla do analizy pracy zawiesznień. Model ten posłużył autorowi do oceny charakterystyk zawiesznień w odniesieniu do jazdy motocykla na torze wyścigowym. Pozwala on również na wprowadzenie modyfikacji motocykla.

Można, zatem stwierdzić, że zostały udowodnione tezy pracy.

Cel pracy – opracowanie metodyki badań numerycznych pozwalającej na optymalizację trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach quasi-statycznych został osiągnięty.

Wnioski dotyczące przyszłych prac

W końcowej części rozdziału ósmego przedstawiono zamierzenia autora dotyczące rozszerzenia badań o zagadnienia. Możliwe kierunki dalszych badań podsumowano w formie następujących punktów:

1. Uwzględnienie w modelu pojazdu bardziej szczegółowego modelu opony oraz siły nośnej (siły docisku), co byłoby szczególnie wskazane ze względu na obserwowany w ostatnich latach znaczący rozwój aerodynamiki pojazdów jednośladowych.
2. Sprzęgnięcie procesu generowania diagramu g-g z utworzoną aplikacją do zarządzania geometrią motocykli, które miałyby na celu uwzględnienie zmian charakterystyk pojazdu spowodowanych ugięciami elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu.
3. Rozbudowanie zaproponowanego modelu drgań o pominięte w pracy aspekty związane z: ujemnym momentem silnika przy zamkniętej przepustnicy, bezwładnością elementów wirujących oraz siłą nośną.

4. Podjęcie próby estymacji kątów znoszenia kół w ruchu optymalnym przy założeniu ruchu krzywoliniowego w warunkach quasi-statycznych oraz uwzględnieniu zmian w geometrii pojazdu spowodowanych ugięciami elementów sprężystych.

Doktorant w przyszłej pracy nie przewiduje rozdzielania masy górnej części motocykla od masy kierowcy.

3 Ocena końcowa

Stwierdzam, że założony cel pracy wykonanej przez mgr inż. Jana Stanisława Biniewicza dotyczącej optymalizacji trajektorii wyścigowych pojazdów jednośladowych w warunkach ruchu quasi-statycznego, został osiągnięty.

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe Autora uznaję:

1. do sterowania motocyklem przyjęto zrywy (pochodne przyspieszeń) w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym,
2. wyznaczono ograniczenia wartości przyjmowanych do analiz, zarówno przyspieszeń pojazdu jak i zrywów, w oparciu o analizę teoretyczną i badania doświadczalne,
3. przeanalizowano i uwzględniono wpływ pochylenia toru wyścigowego na uzyskiwane prędkości i przyspieszenia podczas pokonywania toru,
4. przeanalizowano parametry ruchu podczas wykonywania wybranych manewrów, z uwzględnieniem lub bez, pochylenia terenu,
5. opracowanie modelu drgań pojazdu, pozwalającego na weryfikację ugięć elementów sprężystych w zawieszeniu motocykla, na podstawie znajomości jego przyspieszeń uzyskanych z symulacji lub zarejestrowanych w trakcie badań drogowych.

Uwagi merytoryczne do poszczególnych rozdziałów pracy przedstawione w niniejszej opinii nie obniżają ogólnej wartości pracy, mają charakter porządkowy i dyskusyjny.

Doktorant wykazał się znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, opisał rozwiązania pozwalające na optymalizowanie trajektorii ruchu motocykla, po torach płaskich i z uwzględnieniem ich pochyłeń wzdłużnych i poprzecznych. Wykorzystał dane z pomiarów do ustalenia granicznych wartości parametrów ruchu oraz zwalidował uzyskane wyniki. Doktorant wykazał się umiejętnościami prowadzenia badań symulacyjnych, wykorzystania danych pomiarowych do prowadzonych analiz oraz łączenia zagadnień teoretycznych i praktycznych. Uzyskał oryginalne wyniki oraz wykazał, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty symulacji, badań i analiz oraz formułować poprawne wnioski poznawcze. Widzi również kierunki dalszych badań. Świadczy to o Jego odpowiednim przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych. Rozprawa jest napisana poprawnie z prawidłowym układem tekstu, na dobrym poziomie merytorycznym i edytorskim. Rozprawa jest opracowana na dobrym poziomie naukowym i redakcyjnym oraz wnosi w przedmiotowym zagadnieniu wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie „inżynieria mechaniczna”. Przedstawiona praca ma znaczenie praktyczne.

Praca spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określonym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

Uwagi szczegółowe:

Uwagi merytoryczne i porządkowe do poszczególnych rozdziałów zostały zamieszczone przy omówieniu rozdziałów.

Ponadto do tekstu wnosi się następujące uwagi szczegółowe:

Rysunki - podpisy i wielkości oznaczeń - nieczytelne.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized capital letter 'P' followed by a cursive script that appears to be 'Krawiec'.