

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa PODOSKA

“ANALIZA DRGAŃ MOTOCYKLA ZE WZGLĘDU NA KOMFORT I BEZPIECZEŃSTWO KIEROWCY”

Promotor: **dr hab. inż. Marek Jaśkiewicz, prof. PŚk**
Promotor pomocniczy: **dr inż. Andrzej Zuska**

Dyscyplina naukowa: **inżynieria mechaniczna**
Praca wykonana w Politechnice Świętokrzyskiej

Podstawa opracowania:

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo MAA-511/38/2026 Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej, dr. hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, z 19 czerwca 2026 r. o powołaniu mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie mgr inż. Krzysztofowi PODOSKOWI stopnia doktora.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

1.1. Charakterystyka redakcji pracy

Rozprawa doktorska liczy **242 strony** i została przygotowana w formie zwięzłego opracowania monograficznego. Przed zasadniczą częścią pracy zamieszczono stronę tytułową, podziękowania, spis treści, wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów oraz streszczenie w języku polskim. Część główną tworzy 10 numerowanych rozdziałów, po których zamieszczono podsumowanie i wnioski, kierunki dalszych badań, bibliografię oraz spisy tabel i rysunków. Pracę ilustruje **95 rysunków**, obejmujących schematy, fotografie stanowisk i obiektu badań, przebiegi czasowe, charakterystyki częstotliwościowe oraz wyniki analiz numerycznych, a materiał ilościowy zestawiono w **14 tabelach**.

Rozprawa ma rozbudowany, lecz zasadniczo logiczny układ problemowo-badawczy. Kolejne rozdziały prowadzą od charakterystyki motocykla jako obiektu dynamicznego, omówienia problematyki drgań i metod ich oceny oraz analizy aktualnego stanu wiedzy, poprzez sformułowanie celu, zakresu i metodyki badań, do szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych prowadzonych zarówno w warunkach rzeczywistych, jak i stanowiskowych. Kolejne etapy obejmują odwzorowanie zarejestrowanych wymuszeń w warunkach laboratoryjnych, ocenę skuteczności zaproponowanych modyfikacji konstrukcyjnych oraz modelowanie i analizy numeryczne motocykla. Całość zamykają podsumowanie i wnioski oraz wskazanie kierunków dalszych badań. Przyjęty układ umożliwia prześledzenie kolejnych etapów rozwiązania zarysowanego problemu badawczego – od jego osadzenia w aktualnym stanie wiedzy, poprzez badania eksperymentalne, aż do weryfikacji rozwiązań konstrukcyjnych i analiz numerycznych.

Bibliografia obejmuje 102 pozycje, z których większość stanowią publikacje naukowe, monografie, normy i akty prawne, uzupełnione źródłami internetowymi. Pod względem chronologicznym literatura obejmuje okres od lat 70. XX wieku do 2025 r., przy czym wyraźnie dominują pozycje opublikowane w latach 2000–2019. Spośród 85 źródeł 8 pochodzi sprzed 2000 r., 30 z lat 2000–2009, 36 z lat 2010–2019, natomiast 11 z lat 2020–2025. Wykorzystanie starszych pozycji jest w znacznej części uzasadnione ich fundamentalnym znaczeniem dla teorii drgań, dynamiki pojazdów, metod analizy sygnałów oraz podstaw normatywnych. Pewne zastrzeżenie budzi jednak stosunkowo niewielki udział najnowszych publikacji z lat 2020–2025, szczególnie w części poświęconej analizie aktualnego stanu wiedzy. Szersze uwzględnienie najnowszej literatury mogłoby wzmocnić uzasadnienie aktualności zidentyfikowanych luk badawczych.

Ogólnie strukturę i sposób prezentacji obszernego materiału należy ocenić pozytywnie; praca jest czytelnie podzielona, bogato ilustrowana i pozwala na prześledzenie kolejnych etapów badań, choć miejscami mogłaby zyskać jeszcze na końcowej korekcie redakcyjnej i terminologicznej.

1.2. Charakterystyka treści pracy

Rozdział 1 „Motocykl jako obiekt techniczny” (14 str., 10 rys.) ma charakter wprowadzający i techniczno-opisowy. Autor przedstawia motocykl jako złożony obiekt dynamiczny, wskazując elementy konstrukcji mające znaczenie dla generowania, przenoszenia i ograniczania drgań oddziałujących na kierowcę. W podrozdziale 1.1 przedstawiono ogólną budowę motocykla, jego podstawowe odmiany, rodzaje jednostek napędowych i sposoby przeniesienia napędu, a następnie wskazano elementy generujące i przenoszące drgania. Podrozdziały 1.2 i 1.3 poświęcono rozwiązaniom konstrukcyjnym przedniego i tylnego zawieszenia, natomiast w podrozdziale 1.4 omówiono współczesne rozwiązania elementów sprężysto-tłumiących. Rozdział kończy wskazanie podstawowych czynników mających wpływ na komfort jazdy, obejmujących parametry zawieszenia, sposób mocowania silnika, sztywność ramy oraz zastosowanie rozwiązań mechatronicznych.

Przedstawiony materiał tworzy techniczne tło dla dalszych badań, jednak jego zakres nie jest w pełni proporcjonalny do problematyki rozprawy. Część prezentowanych informacji ma ograniczone znaczenie dla właściwego problemu badawczego, podczas gdy stosunkowo mało miejsca poświęcono analizie motocykla jako układu dynamicznego oraz ilościowym związkom pomiędzy parametrami jego konstrukcji, źródłami wymuszeń i poziomem drgań przenoszonych na kierowcę. Zauważalne są również miejscowe uproszczenia terminologiczne dotyczące takich pojęć jak sztywność, tłumienie czy funkcja zawieszenia. Nie umniejsza to wprowadzającej roli rozdziału, wskazuje jednak na możliwość jego silniejszego ukierunkowania na zasadniczą problematykę rozprawy.

Rozdział 2 „Drgania w transporcie” (12 str., 5 rys., 1 tab.) ma charakter problemowo-wprowadzający i służy przedstawieniu źródeł drgań występujących podczas eksploatacji motocykla oraz ich wpływu na człowieka. Autor wskazuje drgania mechaniczne jako istotny czynnik oddziałujący na komfort i bezpieczeństwo użytkowników środków transportu, podkreślając szczególną sytuację motocyklisty wynikającą z bezpośredniego kontaktu jego ciała z elementami pojazdu.

W podrozdziale 2.1 scharakteryzowano podstawowe źródła drgań motocykla - pracę silnika i układu napędowego, oddziaływania aerodynamiczne, wymuszenia pochodzące od nierówności nawierzchni, drgania rezonansowe elementów konstrukcyjnych oraz oddziaływania związane z toceniem kół oraz wskazano wybrane rozwiązania konstrukcyjne służące ograniczaniu przenoszenia drgań.

Podrozdział 2.2 poświęcono wpływowi drgań na organizm kierowcy. Rozróżniono drgania miejscowe, oddziałujące przede wszystkim na kończyny górne, oraz drgania ogólne przenoszone przez siedzisko i podnóżki. Omówiono możliwe skutki fizjologiczne i funkcjonalne długotrwałej ekspozycji na drgania.

Rozdział 2 stanowi naturalne rozwinięcie części konstrukcyjnej przedstawionej w rozdziale 1 i uzasadnia znaczenie podjętej problematyki badawczej. Ma przede wszystkim charakter opisowy i jakościowy: identyfikuje źródła oraz potencjalne skutki drgań, natomiast w ograniczonym stopniu analizuje mechanizmy dynamiczne ich generowania i przenoszenia w układzie motocykl-kierowca.

Rozdział 3 „Metody pomiarów i analiz ekspozycji na drgania” (12 str., 4 rys. i 2 tab.) ma charakter metodyczno-normatywny. Jego zadaniem jest przedstawienie sposobów pomiaru i ilościowej oceny drgań oddziałujących na człowieka, które stanowią następnie podstawę metodyczną badań eksperymentalnych prowadzonych w dalszej części rozprawy. Autor odwołuje się przede wszystkim do norm ISO i PN-EN dotyczących drgań miejscowych oraz ogólnych.

W podrozdziale 3.1 przedstawiono podstawy normatywnej oceny ekspozycji na drgania oraz rozróżnienie drgań działających na kończyny górne i drgań ogólnych. W podrozdziale 3.2 omówiono sposób pomiaru drgań przenoszonych na kończyny górne w trzech kierunkach, zastosowanie charakterystyki ważenia częstotliwościowego W_h , obliczanie wartości skutecznych przyspieszeń oraz ocenę dziennej ekspozycji.

Podrozdział 3.3 dotyczy analogicznie drgań ogólnych oraz drgań przenoszonych przez stopy. Przedstawiono kierunki pomiaru, charakterystyki ważenia W_d i W_k , współczynniki korekcyjne dla poszczególnych osi oraz sposób wyznaczania wartości dominujących i równoważnej ekspozycji.

W podrozdziale 3.4 zestawiono wartości dopuszczalne i progi dla ekspozycji na drgania miejscowe i ogólne, wynikające z przepisów dotyczących narażenia zawodowego.

Natomiast w podrozdziale 3.5 przedstawiono trzy wskaźniki wykorzystywane w dalszej analizie: RMS, VDV i RMQ, wraz z ich definicjami matematycznymi.

Rozdział 3 ma charakter metodyczno-normatywny i przedstawia podstawy pomiaru oraz ilościowej oceny drgań oddziałujących na człowieka. Omówiono zasady pomiaru drgań miejscowych i ogólnych, stosowane charakterystyki ważenia częstotliwościowego, sposób oceny ekspozycji oraz wartości dopuszczalne i progi działania wynikające z odpowiednich norm i przepisów. W końcowej części przedstawiono wskaźniki RMS, VDV i RMQ. Rozdział stanowi istotne przygotowanie metodyczne do badań własnych, choć wskazane byłoby

bardziej jednoznaczne rozdzielanie kryteriów służących ocenie narażenia zawodowego od kryteriów odnoszących się bezpośrednio do komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

Pewne zastrzeżenie budzi sposób zdefiniowania dwóch podstawowych pojęć występujących w tytule rozprawy – komfortu i bezpieczeństwa kierowcy. Autor wskazuje szereg negatywnych skutków oddziaływania drgań, obejmujących dyskomfort, zmęczenie, pogorszenie koncentracji, skutki zdrowotne oraz możliwość utraty kontroli nad pojazdem, nie dokonuje jednak jednoznacznego rozgraniczenia tych zjawisk ani nie formułuje operacyjnych definicji komfortu i bezpieczeństwa przyjętych w pracy. Problem ten jest szczególnie widoczny w rozdziale 3, w którym przedstawiono wskaźniki RMS, VDV i RMQ oraz normatywne wartości ekspozycji na drgania, lecz nie wskazano jednoznacznie, które z nich i według jakich kryteriów służą ocenie komfortu, a które bezpieczeństwa motocyklisty. Wartości NDN (najwyższego dopuszczalnego natężenia) i wartości progowe dziennej ekspozycji na drgania odnoszą się przede wszystkim do ochrony zdrowia przy ekspozycji na drgania, co nie jest tożsame z oceną bezpieczeństwa prowadzenia motocykla. W kontekście tytułu rozprawy wskazane byłoby bardziej precyzyjne zdefiniowanie obu kryteriów oraz jednoznaczne powiązanie ich z zastosowanymi miarami oceny drgań.

Rozdział 4 „Studium literatury naukowej” (18 str., 3 rys.) pełni funkcję zasadniczego przeglądu stanu wiedzy i bezpośrednio przygotowuje uzasadnienie badań własnych. Został podzielony na trzy części odpowiadające trzem zasadniczym obszarom rozprawy: badaniom eksperymentalnym drgań motocyklistów, modelowaniu numerycznemu oraz stanowiskowym badaniom motocykli. Przedmiotem przeglądu są metody pomiaru, analizy i modelowania drgań w kontekście komfortu wibracyjnego i bezpieczeństwa kierowcy.

W podrozdziale 4.1 na podstawie 16 źródeł przedstawiono dotychczasowe badania dotyczące ekspozycji motocyklistów na drgania miejscowe i ogólne. Omawiane prace dotyczą m.in. skutków zdrowotnych, pomiarów drgań na kierownicy, siedzisku i podnóżkach, wpływu nawierzchni, konstrukcji motocykla i cech kierowcy, a także wykorzystania urządzeń ubieralnych czy metod modelowych. Autor kończy tę część próbą uporządkowania stosowanych metod w trzy grupy: bezpośrednie pomiary przyspieszeń, metody pośrednie i modelowe oraz rozwiązania wykorzystujące systemy mobilne i urządzenia ubieralne.

Podrozdział 4.2, bazując na 7 źródłach, poświęcono modelom symulacyjnym i analizom numerycznym stosowanym do oceny komfortu wibracyjnego. Przedstawiono przykłady analizy modalnej, modelowania wieloczęstotliwościowego z uwzględnieniem modelu człowieka oraz modeli sztywno-elastycznych. Na tej podstawie Autor formułuje lukę badawczą w postaci braku kompleksowego modelu motocykla uwzględniającego jednocześnie zmienne warunki drogowe i parametry eksploatacyjne oraz wskazuje potrzebę integracji badań drogowych, stanowiskowych i numerycznych.

W podrozdziale 4.3 na podstawie 3 źródeł przedstawiono stanowiska laboratoryjne umożliwiające odwzorowanie wymuszeń działających na motocykl. Omówiono ich konstrukcję, możliwości wymuszania ruchu motocykla oraz zakres mierzonych parametrów. Rozdział kończy wniosek o potrzebie budowy stanowisk umożliwiających odtwarzanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych w sposób kontrolowany i powtarzalny, co bezpośrednio przygotowuje grunt pod wykorzystane i rozbudowane w rozprawie stanowisko badawcze.

Rozdział 4 stanowi właściwy przegląd stanu wiedzy. Jego zaletą jest powiązanie analizowanej literatury z dalszym programem badań oraz próba wskazania istniejących luk badawczych. Przegląd ma jednak miejscami charakter bardziej referujący niż krytyczno-analityczny, a część jego treści powtarza zagadnienia przedstawione już w rozdziałach 2 i 3. Stosunkowo ograniczony jest również zakres przeglądu modeli numerycznych i stanowisk badawczych w stosunku do znaczenia tych zagadnień dla dalszych części rozprawy. Sformułowane luki badawcze wymagają zatem nieco silniejszego uzasadnienia wynikającego z systematycznego porównania dotychczasowych rozwiązań.

Rozdział 5 „Cel i zakres pracy” (5 str.) jest krótki, ale kluczowy dla konstrukcji całej rozprawy, ponieważ dopiero tutaj Autor częściowo formalizuje problem badawczy, cele pracy, jej zakres oraz przyjętą metodologię. Autor wychodzi od wniosku z przeglądu literatury, że ekspozycja motocyklistów na drgania jest istotnym problemem wpływającym na komfort jazdy i zdrowie użytkowników. Wskazuje przy tym na rozwój metod pomiarowych i możliwość łączenia badań drogowych, stanowiskowych i analiz numerycznych.

W podrozdziale 5.1 sformulowano cel teoretyczny jako opracowanie zweryfikowanego modelu matematycznego motocykla, umożliwiającego analizę drgań oddziałujących na motocyklistę.

Z kolei w 5.2 zapisano, że celem praktycznym jest opracowanie i weryfikacja rozwiązań technicznych ograniczających drgania, a przez to poprawiających komfort i bezpieczeństwo użytkownika motocykla.

W części 5.3 „Uzasadnienie” Autor wskazuje przede wszystkim skutki ergonomiczne i zdrowotne ekspozycji na drgania oraz jako lukę badawczą podaje niedostateczną integrację pomiarów terenowych, badań stanowiskowych i analiz numerycznych, a także ograniczone wykorzystanie stanowisk umożliwiających wierne odtwarzanie warunków drogowych.

Zakres pracy jest szeroki i obejmuje przegląd literatury, opracowanie metody pomiarowej, budowę stanowiska laboratoryjnego, badania drogowe i stanowiskowe, opracowanie modelu matematycznego oraz zaprojektowanie i weryfikację tłumika drgań. Metodologia zakłada z kolei integrację pomiarów rzeczywistych, odtwarzania wymuszeń na stanowisku, analizy sygnałów w MATLAB-ie oraz modelowania i symulacji w SolidWorks i LS-DYNA.

W odniesieniu do rozdziału 5 pozytywnie należy ocenić kompleksową koncepcję badań, integrującą pomiary w warunkach rzeczywistych, badania stanowiskowe, analizę sygnałów, modelowanie numeryczne oraz weryfikację proponowanych modyfikacji konstrukcyjnych.

Pewne zastrzeżenia budzi natomiast nieprecyzyjne określenie modelu tworzonego w pracy jako „modelu matematycznego”, podczas gdy przyjęta metodologia wskazuje przede wszystkim na model numeryczny realizowany w środowisku LS-DYNA. Ponadto, mimo zapowiedzi sformułowania „tez rozprawy” (str. 69), w rozdziale nie przedstawiono jednoznacznie tezy ani hipotez badawczych. Nadal nie zdefiniowano również w sposób operacyjny podstawowych pojęć występujących w tytule pracy – komfortu i bezpieczeństwa – ani nie wskazano jednoznacznych kryteriów ich ilościowej oceny.

Rozdział 6 „Badania eksperymentalne – pomiar drgań oddziałujących na motocyklistę w warunkach rzeczywistych” (49 str., 22 rys. i 3 tab.) jest pierwszym obszernym rozdziałem prezentującym badania własne Autora. Ma zasadnicze znaczenie dla rozprawy, ponieważ **dostarcza danych eksperymentalnych** wykorzystywanych później do badań stanowiskowych i modelowania numerycznego. Autor podkreśla jako element oryginalności jednoczesną rejestrację drgań na kierownicy, siedzisku oraz w pobliżu osi przedniego i tylnego koła, a także badania na kilku rodzajach nawierzchni.

W podrozdziale 6.1 scharakteryzowano obiekt badań – motocykl Yamaha XV 125 – podając podstawowe parametry techniczne, konfigurację zawieszenia, ciśnienie w oponach i informacje dotyczące stanu technicznego pojazdu. **W 6.2 opisano układ pomiarowy** wykorzystujący cztery trójosiowe czujniki PCB 356B41. Na kierownicy i siedzisku rejestrowano trzy składowe przyspieszeń, natomiast przy osiach kół wykorzystywano składową pionową. Częstotliwość próbkowania wynosiła 200 Hz.

W podrozdziale 6.3 przedstawiono warunki eksperymentu. Badania wykonano na sześciu rodzajach wymuszeń drogowych: dobrym i złym asfalcie, kostce brukowej, prefabrykowanych płytach betonowych oraz dwóch rodzajach progów. Prędkości wynosiły odpowiednio 50, 20, 10 lub 20 km/h, zależnie od odcinka. Autor podaje, że kierowca utrzymywał stałą pozycję, a pojedynczy przejazd trwał 30–60 s.

Najobszerniejsza część, **6.4, dotyczy analizy w dziedzinie czasu.** Autor porównuje przebiegi przyspieszeń na kierownicy i siedzisku, wartości maksymalne i odchylenia standardowe, a następnie wskaźniki RMS, VDV i RMQ dla trzech kierunków. Generalnym wynikiem jest znacznie większa intensywność drgań na kierownicy niż na siedzisku oraz silny wpływ rodzaju nawierzchni.

W 6.5 przeprowadzono analizę częstotliwościową FFT. Autor wykorzystuje 10-sekundowe fragmenty sygnałów, usuwa składową stałą, stosuje okno Hanna i wyznacza jednostronne widma amplitudowe. Przy próbkowaniu 200 Hz otrzymuje rozdzielczość 0,1 Hz i pasmo analizy do 100 Hz. W zależności od nawierzchni identyfikuje pasma poniżej 20 Hz oraz składowe około 50–60 i 80–90 Hz, które wiąże z odpowiedzią zawieszenia i możliwymi wzbudzeniami rezonansowymi elementów konstrukcji.

Analiza częstotliwościowa została przeprowadzona w celu identyfikacji dominujących pasm drgań oraz określenia ich zależności od rodzaju nawierzchni i miejsca pomiaru. Autor zastosował poprawną podstawową procedurę analizy FFT, obejmującą usunięcie składowej stałej, okno Hanna oraz wyznaczenie jednostronnych widm amplitudowych dla 10-sekundowych próbek. Wyniki pozwoliły na wskazanie dominujących pasm poniżej 20 Hz oraz około 50–60 i 80–90 Hz. Wątpliwości budzi jednak interpretowanie wybranych pików jako efektów rezonansowych bez niezależnej identyfikacji częstotliwości własnych lub analizy transmitancji pomiędzy wymuszeniem a odpowiedzią układu. Nie przedstawiono jednoznacznie czy prezentowane widma poddano ważeniu odpowiednimi charakterystykami W_d , W_k lub W_h , co rodzi pytanie na ile przedstawione widma amplitudowe przekładają się ilościowo na ocenę komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

Rozdział 6 stanowi wartościową i rozbudowaną część eksperymentalną rozprawy. Na pozytywną ocenę zasługuje zakres badań drogowych, wielopunktowa rejestracja drgań oraz wykorzystanie analiz w dziedzinie czasu i częstotliwości, a także powiązanie uzyskanych wyników z dalszymi badaniami stanowiskowymi.

Pewne zastrzeżenia budzą jednak elementy metodyki oraz interpretacji wyników. Dotyczą one przede wszystkim ograniczenia pasma pomiarowego wynikającego z częstotliwości próbkowania 200 Hz w kontekście normatywnej oceny drgań miejscowych, braku szerszej analizy powtarzalności i niepewności wyników, częściowego nakładania się wpływu rodzaju nawierzchni i prędkości jazdy oraz niektórych niespójności pomiędzy podawanymi wartościami maksymalnymi i wskaźnikami RMS. Ostrożniejszej interpretacji wymagają również przypisania obserwowanych pików widmowych zjawiskom rezonansowym oraz bezpośrednie wiązanie uzyskanych wskaźników drganiowych z bezpieczeństwem motocyklisty. Warto

też zwrócić uwagę na możliwość pełniejszego wykorzystania zgromadzonego materiału badawczego poprzez zastosowanie zestawień porównawczych zarówno wartości obliczonych wskaźników, jak i przebiegów widm amplitudowych dla różnych nawierzchni. Pomimo tych uwag rozdział dostarcza istotnego materiału eksperymentalnego stanowiącego podstawę dalszych etapów pracy.

Rozdział 7 „Stanowiskowe badania eksperymentalne do oceny drgań” (15 str., 7 rys., 2 tab.) ma charakter opisowy w zakresie konstrukcji i aparatury stanowiska badawczego. Wbrew tytułowi (bardziej adekwatny byłby tytuł typu „Stanowisko do badań eksperymentalnych drgań motocykla”) nie przedstawia wyników badań stanowiskowych; jego zasadniczym celem jest opis rozbudowanego stanowiska, jego konstrukcji, wyposażenia i możliwości funkcjonalnych. Autor podkreśla, że stanowisko zostało rozbudowane w ramach rozprawy na bazie istniejącego stanowiska zbudowanego w 2000 r. przez dr. Andrzeja Zuskę. **Jako własne rozwinięcia wskazuje m.in. rozwiązania umożliwiające montaż przedniego widelca i tylnego wahacza oraz współpracę z dwoma elektrohydraulicznymi wzbudnikami.**

Stanowisko wykorzystuje dwa pulsatory, układ hydrauliczny, sterownik pulsatora MTS oraz oprogramowanie MTS Series 793 i Moog Replication. Konstrukcja umożliwia niezależne wymuszanie ruchu przedniego i tylnego zawieszenia motocykla. Szczegółowo opisano układ wodząco-prowadzący, regulowane zespoły mocujące przednie i tylne zawieszenie oraz rozwiązanie przegubowe mające ograniczać niepożądane obciążenia momentowe.

Dwa pulsatory mają maksymalną siłę 25 kN, skok do 152/254 mm i deklarowaną częstotliwość ruchów do 100 Hz. Autor przedstawia także ich charakterystyki skok–częstotliwość i przyspieszenie–częstotliwość. Dalej opisano zespół zasilania hydraulicznego i układ sterowania.

Szczególnie istotne dla całej koncepcji rozprawy jest zastosowanie Moog Replication, którego zadaniem jest odtwarzanie na stanowisku przebiegów czasowych zarejestrowanych wcześniej podczas badań drogowych. Sygnały mają być podawane jednocześnie na przednie i tylne zawieszenie. Autor traktuje to jako podstawę integracji badań drogowych, laboratoryjnych i numerycznych.

Rozdział 7 opisuje opracowane stanowisko stanowiące istotny element aplikacyjny rozprawy i umożliwiające realizację powtarzalnych eksperymentów laboratoryjnych. Pewnego doprecyzowania wymaga jednak zakres oryginalnego wkładu Doktoranta w konstrukcję stanowiska, ponieważ zostało ono opracowane poprzez rozbudowę wcześniej istniejącego układu (w 2000 roku przez dr inż. A. Zuskę). Zbyt kateryczne wydają się również stwierdzenia o „wiernym” odwzorowaniu rzeczywistych warunków oraz pełnej przydatności stanowiska do oceny komfortu i bezpieczeństwa przed przedstawieniem ilościowej walidacji jakości reprodukcji wymuszeń.

Rozdział 8 „Odwzorowanie drgań zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych na stanowisku badawczym” (28 str., 11 rys., 4 tab.) poświęcono opracowaniu i weryfikacji procedury laboratoryjnego odtwarzania wymuszeń zarejestrowanych podczas badań drogowych. Stanowi on logiczne połączenie badań przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych, opisanych w rozdziale 6, ze stanowiskiem badawczym przedstawionym w rozdziale 7. Do procesu replikacji wykorzystano sygnały przyspieszeń zarejestrowane w okolicy osi przedniej i tylnej motocykla dla sześciu rodzajów nawierzchni i wymuszeń drogowych. Sygnały poddano wstępnemu przetwarzaniu, obejmującemu filtrację i synchronizację, a następnie wykorzystano jako przebiegi wzorcowe w iteracyjnym procesie realizowanym za pomocą oprogramowania Moog Replication.

Autor szczegółowo przedstawia procedurę iteracyjnego dopasowania sygnałów sterujących do wymaganej odpowiedzi układu. Jako podstawę oceny zgodności wykorzystano porównania przebiegów czasowych, podstawowe parametry statystyczne, w tym wartości minimalne i maksymalne, RMS, wariancję, skośność i kurtozę, a także analizy w dziedzinie częstotliwości obejmujące gęstość widmową mocy, funkcję spójności oraz charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej FRF. Uzupełnieniem oceny są porównania widm, wykresy rozproszenia oraz analiza zmian parametrów sygnałów w kolejnych iteracjach.

Szczegółową prezentację procesu replikacji przeprowadzono na przykładzie jazdy po nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym. W końcowej iteracji wartości RMS sygnału wzorcowego i odpowiedzi stanowiska różniły się o mniej niż 1%, a porównania przebiegów czasowych i widmowych wskazują na dobrą zgodność odtwarzanych sygnałów.

W końcowej części rozdziału przedstawiono zbiorcze wyniki replikacji dla wszystkich sześciu wariantów drogowych. Liczba wymaganych iteracji wynosiła od 4 do 9, przy czym większej liczby korekt wymagały niektóre wymuszenia o bardziej impulsowym charakterze. Autor uznaje uzyskaną zgodność za wystarczającą do wykorzystywania stanowiska w dalszych badaniach dotyczących ograniczania drgań motocykla.

Rozdział 8 stanowi ważny element części eksperymentalnej rozprawy, ponieważ przedstawia procedurę laboratoryjnego odwzorowania wymuszeń zarejestrowanych podczas badań drogowych i tym samym łączy badania w warunkach rzeczywistych z dalszymi eksperymentami stanowiskowymi. Pozytywnie należy ocenić zastosowanie iteracyjnej procedury replikacji oraz wielokryterialną ocenę jej jakości, obejmującą

analizę przebiegów czasowych, parametrów statystycznych, widm PSD, funkcji spójności, charakterystyk FRF oraz błędów odwzorowania. Uzyskane wyniki wskazują na wysoką zgodność sygnałów wzorcowych i odtwarzanych, w szczególności pod względem wartości RMS.

Pewne zastrzeżenia dotyczą jednak sposobu walidacji i interpretacji wyników. Zgodność procesu replikacji oceniono przede wszystkim na podstawie sygnałów przyspieszeń przy osiach przedniej i tylnej, nie wykazując bezpośrednio, czy równie dobra zgodność występuje w punktach kontaktu motocyklisty z pojazdem – na kierownicy i siedzisku. Wymaga również doprecyzowania sposobu przekształcania wzorcowych przebiegów przyspieszeń w sygnały sterujące przemieszczeniem pulsatorów, parametry zastosowanej filtracji oraz formalne kryterium zakończenia procesu iteracyjnego. Wyjaśnienia wymaga również niejednoznaczne zdefiniowanie błędów minimalnych i maksymalnych w zbiorczym zestawieniu wyników.

Uwagi te nie podważają wartości przeprowadzonego procesu replikacji, wskazują jednak na możliwość pełniejszego wykorzystania zgromadzonego materiału eksperymentalnego oraz bardziej jednoznacznego wykazania jego przydatności do oceny komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

Rozdział 9 „Modyfikacja zawieszenia oraz manetek kierownicy” (12 str., 4 rys., 1 tab.) stanowi aplikacyjną część rozprawy, w której Autor wykorzystuje wcześniej opracowane stanowisko i procedurę replikacji wymuszeń do oceny możliwości ograniczenia drgań poprzez zmiany konstrukcyjne motocykla.

W pierwszej części rozdziału przedstawiono dosyć pobieżnie trzy grupy modyfikacji. Tylne zawieszenie zastąpiono rozwiązaniem pneumatycznym umożliwiającym zmianę jego charakterystyki poprzez regulację ciśnienia. W zawieszeniu przednim zastosowano dodatkowy amortyzator z regulacją tłumienia, blokadą skoku oraz możliwością zmiany ciśnienia w komorze powietrznej. Trzecia grupa zmian dotyczyła manetek kierownicy: wykonano dwa warianty metodą druku 3D oraz osiem wariantów z miękkich kompozytów silikonowych o różnych twardościach i grubościach. Można przyjąć, że modyfikacje te same w sobie nie były przedmiotem problemu badawczego a bardziej przykładem zilustrowania przydatności opracowanego stanowiska i metody badawczej – w efekcie samo ich opracowanie zostało opisane w minimalnym stopniu.

W podrozdziale 9.1 przedstawiono metodykę badań stanowiskowych. Przyspieszenia rejestrowano trójosiowo na kierownicy i w pobliżu siedziska, a wyniki analizowano w dziedzinie czasu i częstotliwości, wykorzystując m.in. RMS i FFT. Autor deklaruje zachowanie jednakowych warunków obciążenia i konfiguracji stanowiska.

Właściwe porównanie modyfikacji zawarto w podrozdziale 9.2. Stopień redukcji drgań określono jako względną zmianę wartości RMS w stosunku do konfiguracji bazowej. Dla każdej konfiguracji wykonywano trzy pomiary, a następnie wyniki uśredniano. Przebadano łącznie 22 warianty modyfikacji — 3 ustawienia zawieszenia tylnego, 9 zawieszenia przedniego i 10 wariantów manetek — dla sześciu scenariuszy drogowych, co Autor określa jako 132 przypadki pomiarowe.

W tabeli 9.1 przedstawiono konfiguracje uznane za optymalne dla poszczególnych nawierzchni. Największe redukcje przypisano zmianom tylnego zawieszenia — do około 13%, zawieszenia przedniego — do 12%, a manetek — do 9%. Autor podkreśla przy tym, że wartości dotyczą indywidualnego wpływu poszczególnych modyfikacji i nie powinny być sumowane. Nie przedstawiono wyników analizy częstotliwościowej — skomentowano tylko w jakich zakresach częstotliwości odnotowywano poprawę przy poszczególnych modyfikacjach.

W rozdziale 9 na pozytywną ocenę zasługuje przejście od identyfikacji problemu drganiowego do zilustrowania możliwości stanowiskowej weryfikacji konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych poprzez wykorzystanie powtarzalnych wymuszeń odpowiadających sześciu warunkom drogowym. Wyniki wskazują na możliwość obserwacji redukcji poziomu drgań poprzez odpowiedni dobór parametrów zawieszenia oraz właściwości materiałowych manetek. Pewnego doprecyzowania wymaga jednak sposób definiowania procentowej redukcji drgań, w tym wskazanie punktu pomiarowego, kierunku i sposobu przetwarzania sygnału stanowiącego podstawę porównania. Nie wszystkie wnioski dotyczące selektywności częstotliwościowej modyfikacji oraz ich synergicznego działania znajdują pełne ilościowe potwierdzenie w przedstawionych zestawieniach – wartościowe byłyby wykresy ilustrujące zmiany uzyskiwanych odpowiedzi albo transmitancji.

Rozdział 10 „Metodyka modelowania i analiz numerycznych motocykla w badaniach drgań” (38 str., 29 rys. i 1 tab.) jest ostatnim zasadniczym rozdziałem badawczym rozprawy. Jego celem było opracowanie numerycznego modelu motocykla Yamaha XV 125, jego przygotowanie do analiz dynamicznych w LS-DYNA oraz weryfikacja poprzez porównanie odpowiedzi obliczeniowej z wynikami eksperymentalnymi. Autor przedstawia tę część jako trzeci element zintegrowanej metodyki: badania drogowe – badania stanowiskowe – symulacja numeryczna.

Podrozdział 10.1 opisuje opracowanie uproszczonego modelu geometrycznego motocykla na podstawie pomiarów rzeczywistego pojazdu. Odwzorowano główne elementy motocykla, m.in. ramę, zawieszenie, układ

kierowniczy, silnik, zbiornik paliwa i siedzisko, uwzględniając także ich właściwości materiałowe i rozmieszczenie mas.

Podrozdział 10.2 przedstawia transfer modelu do LS-DYNA, weryfikację geometrii, przypisanie materiałów, przygotowanie siatki MES i warunków brzegowych. Jako wymuszenia zastosowano pionowe przebiegi przyspieszeń zarejestrowane na osiach motocykla. Uwzględniono również nieliniowe charakterystyki elementów zawieszenia.

Podrozdział 10.3 obejmuje wstępną weryfikację modelu dla dobrej nawierzchni asfaltowej. Odpowiedzi modelu na kierownicy i siedzisku porównano z wynikami badań laboratoryjnych, a uzyskane różnice wykorzystano do korekty parametrów tłumienia zawieszenia.

Podrozdział 10.4 zawiera walidację modelu dla sześciu warunków drogowych. Porównano wartości przyspieszeń na kierownicy i siedzisku, przyjmując jako podstawowe kryterium względny błąd RMS. Uzyskane różnice wynosiły od 3 do 12%.

W ocenie rozdziału 10 pozytywnie należy ocenić kompleksowe powiązanie modelowania numerycznego z wcześniej przeprowadzonymi badaniami drogowymi i stanowiskowymi, wykorzystanie rzeczywistych przebiegów wymuszeń, uwzględnienie nieliniowych charakterystyk elementów zawieszenia oraz przeprowadzenie kalibracji modelu na podstawie danych eksperymentalnych. Istotnym atutem jest także walidacja modelu dla sześciu zróżnicowanych warunków drogowych oraz ocena zgodności odpowiedzi w punktach bezpośrednio związanych z oddziaływaniem drgań na motocyklistę – na kierownicy i siedzisku. Takie podejście zwiększa wiarygodność modelu jako narzędzia do analiz porównawczych i dalszych badań wariantowych.

Należy jednak zwrócić uwagę na istotne uproszczenia modelu, w szczególności brak modelowania kontaktu opony z nawierzchnią i modelu biomechanicznego kierowcy oraz zadawanie zmierzonych przyspieszeń osi bezpośrednio jako wymuszeń modelu. Nie przedstawiono jednak wartości liczbowych ani wykresów zastosowanych charakterystyk sztywności i tłumienia zawieszenia, co ogranicza możliwość odtworzenia modelu. Doprecyzowania wymagają także szczegóły dyskretyzacji i rozwiązania numerycznego oraz uzasadnienie przyjętego poziomu błędu walidacji. Sama zgodność wartości RMS stanowi przy tym stosunkowo ograniczone kryterium oceny jakości modelu w analizie zjawisk drganiowych.

Część „Podsumowanie i wnioski” (5 str.) syntetyzuje wyniki całej rozprawy i odnosi je do sformułowanych wcześniej celów badawczych. Autor podkreśla kompleksowy charakter zastosowanego podejścia, obejmującego badania drogowe, stanowiskową replikację wymuszeń, ocenę modyfikacji konstrukcyjnych oraz modelowanie numeryczne. Stwierdza przy tym, że cel teoretyczny zrealizowano poprzez opracowanie i weryfikację modelu numerycznego motocykla Yamaha XV 125, natomiast cel praktyczny – poprzez opracowanie metodyki pomiarowej, odwzorowanie warunków drogowych na stanowisku oraz wskazanie rozwiązań ograniczających drgania. Warto tu jednak zwrócić uwagę, że w rozdziale 5 zapisano, że celem praktycznym jest opracowanie i weryfikacja rozwiązań technicznych ograniczających drgania. I rzeczywiście taką weryfikację przeprowadzono, natomiast samo opracowanie tych rozwiązań nie zostało szczegółowo udokumentowane. W ocenie Recenzenta większą wartość praktyczną ma opracowana metodyka, która umożliwiła wspomnianą weryfikację i może być wykorzystywana do oceny kolejnych rozwiązań konstrukcyjnych.

W dalszej części Autor podsumowuje wpływ rodzaju nawierzchni na poziom drgań oraz wskazuje potrzebę równoczesnego uwzględniania oddziaływań na kierownicę i siedzisko. Przedstawia również rezultaty badań modyfikacji konstrukcyjnych: maksymalną redukcję drgań do 13% dla tylnego zawieszenia, 12% dla przedniego oraz 9% dla manetek, zaznaczając prawidłowo, że efektów tych nie należy sumować.

Podsumowano także wyniki dotyczące stanowiska laboratoryjnego i modelu numerycznego. Autor wskazuje, że stanowisko umożliwia powtarzalne odtwarzanie wymuszeń drogowych, natomiast model LS-DYNA uzyskał zgodność z eksperymentem przy błędzie RMS nieprzekraczającym 12%. Wyniki pracy określono jako mające zarówno znaczenie poznawcze, jak i aplikacyjne.

Część „Podsumowanie i wnioski” eksponuje wartość zintegrowanego podejścia łączącego badania drogowe, stanowiskowe i numeryczne. Pozytywnie należy ocenić szeroko i perspektywicznie zarysowane kierunki dalszych badań, które jednocześnie dobrze wskazują na ograniczenia obecnego etapu badań.

2. OCENA SPEŁNIENIA WYMAGAŃ STAWIANYCH ROZPRAWOM DOKTORSKIM W USTAWIE PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE

Oceny dokonano w odniesieniu do wymagań ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.).

2.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (art. 187 ust. 1)

Przedstawiona rozprawa wskazuje, że Doktorant **posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna**, w szczególności w zakresie dynamiki pojazdów, drgań mechanicznych, konstrukcji i właściwości układów zawieszenia motocykli, metod pomiaru i analizy sygnałów drganiowych oraz modelowania i analiz numerycznych układów mechanicznych. W części teoretycznej pracy Doktorant omówił źródła oraz drogi transmisji drgań w motocyklu, a także zagadnienia ich oddziaływania na człowieka, metody oceny drgań miejscowych i ogólnych oraz podstawy normatywne stosowanych wskaźników. **Wiedza ta została następnie wykorzystana przy projektowaniu i realizacji własnego programu badań eksperymentalnych i numerycznych.**

O umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej świadczy przede wszystkim zakres i wieloetapowy charakter przeprowadzonych badań. Doktorant zrealizował badania drogowe obejmujące wielopunktową rejestrację drgań motocykla w zróżnicowanych warunkach nawierzchniowych, następnie wykorzystał zarejestrowane sygnały do ich odtworzenia na stanowisku laboratoryjnym przy zastosowaniu iteracyjnej procedury replikacji. W dalszej części pracy przeprowadził badania wpływu modyfikacji przedniego i tylnego zawieszenia oraz manetek kierownicy na poziom drgań. Program badawczy Doktorant uzupełnił opracowaniem modelu numerycznego motocykla w środowisku LS-DYNA oraz jego walidacją poprzez porównanie odpowiedzi symulacyjnej i eksperymentalnej dla sześciu rodzajów wymuszeń drogowych.

Na pozytywną ocenę zasługuje w szczególności umiejętność powiązania kolejnych etapów badań w spójną metodykę, obejmującą pomiary w warunkach rzeczywistych, laboratoryjne odtwarzanie wymuszeń, badania wariantów konstrukcyjnych oraz analizę numeryczną. Sam Autor wskazuje jako istotny element pracy integrację badań terenowych, stanowiskowych i numerycznych, stanowiącą odpowiedź na zidentyfikowaną lukę badawczą. **Zdolność do przeprowadzenia takiego programu, przetwarzania i interpretacji uzyskanych danych oraz konfrontowania wyników symulacji z eksperymentem świadczy o opanowaniu warsztatu badawczego właściwego dla dyscypliny inżynieria mechaniczna.**

W rozprawie występują wprawdzie pewne niedoskonałości dotyczące m.in. precyzji definiowania kryteriów komfortu i bezpieczeństwa, niektórych aspektów analizy sygnałów oraz zakresu ilościowej walidacji wyników, mają one jednak charakter szczegółowy i nie podważają oceny kompetencji Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Na podstawie przedstawionej rozprawy stwierdzam, że mgr inż. Krzysztof Podosek wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, spełniając tym samym wymagania określone w art. 187 ust. 1 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2.2. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego (art. 187 ust. 2)

Problem badawczy podjęty w rozprawie został przez Autora określony w rozdziale 5 jako zagadnienie oceny drgań oddziałujących na kierujących motocyklami. Jego bardziej szczegółowe określenie wynika z przedstawionego uzasadnienia podjęcia badań. Autor wskazuje w nim przede wszystkim na niedostateczną liczbę prac integrujących pomiary terenowe, badania stanowiskowe i analizy numeryczne, a także na ograniczone wykorzystanie stanowisk laboratoryjnych umożliwiających odtwarzanie rzeczywistych warunków drogowych.

Należy przy tym zauważyć, że problem naukowy nie został w rozprawie wyodrębniony w postaci jednoznacznego pytania badawczego lub hipotezy. Autor stwierdza wprawdzie, że problem badawczy stanowił podstawę do sformułowania „celów badawczych oraz tez rozprawy”, jednak tezy takie nie zostały następnie wyraźnie wyartykułowane. **Istota problemu naukowego wynika zatem z łącznego rozpatrzenia zidentyfikowanej luki badawczej, celów pracy oraz przyjętej metodyki. Cel teoretyczny określono jako opracowanie zweryfikowanego modelu motocykla umożliwiającego analizę drgań oddziałujących na motocyklistę, natomiast cel praktyczny jako opracowanie i weryfikację rozwiązań technicznych ukierunkowanych na ograniczenie tych drgań.**

Za zasadniczy element oryginalnego rozwiązania tak rozumianego problemu należy uznać opracowanie i eksperymentalną realizację zintegrowanej metodyki badawczej, w której kolejne etapy pozostają ze sobą bezpośrednio powiązane. Obejmuje ona:

- rejestrację drgań motocykla w rzeczywistych warunkach ruchu,
- wykorzystanie zarejestrowanych sygnałów do laboratoryjnego odtworzenia wymuszeń drogowych,
- prowadzenie w powtarzalnych warunkach badań wpływu modyfikacji konstrukcyjnych,
- opracowanie i walidację modelu numerycznego motocykla.

Takie podejście **umożliwia analizę tego samego problemu w warunkach drogowych, stanowiskowych i numerycznych oraz wzajemną weryfikację wyników uzyskiwanych na poszczególnych etapach.**

Istotnym elementem własnego dorobku badawczego Doktoranta jest wykorzystanie wielopunktowej rejestracji przyspieszeń, obejmującej zarówno obszary osi motocykla, jak i miejsca kontaktu kierowcy z pojazdem, oraz zastosowanie danych z badań drogowych jako sygnałów wzorcowych w procesie ich iteracyjnego odwzorowania na stanowisku badawczym. Uzyskane w ten sposób kontrolowane i powtarzalne wymuszenia wykorzystano następnie do badań 22

wariantów modyfikacji zawieszenia przedniego i tylnego oraz manetek, analizowanych dla sześciu scenariuszy nawierzchniowych.

Kolejnym elementem rozwiązania problemu jest opracowanie uproszczonego modelu numerycznego motocykla oraz jego weryfikacja na podstawie wyników eksperymentalnych. Model sprawdzono dla sześciu zróżnicowanych wymuszeń drogowych, porównując odpowiedzi obliczeniowe i pomiarowe na kierownicy i siedzisku. Uzyskane błędy względne wartości RMS wynosiły od 3 do 12%, co pozwala traktować model jako narzędzie przydatne przede wszystkim do analiz porównawczych i oceny wpływu zmian warunków wymuszenia.

Wartość aplikacyjną rozwiązania wzmacniają wyniki badań modyfikacji konstrukcyjnych. Dla pojedynczych zmian uzyskano maksymalną redukcję drgań wynoszącą do 13% dla zawieszenia tylnego, do 12% dla zawieszenia przedniego oraz do 9% dla manetek kierownicy. Autor słusznie zaznacza przy tym, że efekty poszczególnych modyfikacji nie powinny być sumowane ze względu na wzajemne i nieliniowe oddziaływanie elementów układu.

Oryginalności rozprawy nie należy zatem upatrywać w opracowaniu nowej teorii drgań motocykla ani w pojedynczym zastosowanym narzędziu badawczym. Jej zasadniczą wartością jest metodyczne połączenie badań drogowych, stanowiskowej replikacji rzeczywistych wymuszeń, eksperymentalnej oceny modyfikacji konstrukcyjnych oraz modelowania numerycznego w spójny i zweryfikowany ciąg badawczy. Podejście to pozwoliło uzyskać własne wyniki dotyczące transmisji i możliwości ograniczania drgań oddziałujących na motocyklistę.

Pomimo wskazanego niedostatku polegającego na niezbyt precyzyjnym, formalnym sformułowaniu samego problemu naukowego i też rozprawy, zakres przeprowadzonych badań, sposób ich wzajemnego powiązania oraz uzyskane rezultaty pozwalają, w mojej ocenie, uznać, że rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w rozumieniu art. 187 ust. 2 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2.3. Ocena aspektów formalnych (art. 187 ust. 3 i 4)

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana w formie zwartej pracy pisemnej o charakterze monograficznym, a zatem w jednej z form przewidzianych w art. 187 ust. 3 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Jej monograficzny charakter wynika z jednolitej koncepcji pracy, podporządkowania kolejnych rozdziałów wspólnemu problemowi badawczemu oraz przedstawienia całego procesu badawczego w postaci spójnej sekwencji obejmującej analizę stanu wiedzy, sformułowanie celów i zakresu pracy, badania w warunkach rzeczywistych, badania stanowiskowe, ocenę modyfikacji konstrukcyjnych oraz modelowanie i walidację numeryczną. Poszczególne części pozostają ze sobą merytorycznie powiązane, a wyniki uzyskiwane na kolejnych etapach są wykorzystywane w dalszych badaniach. Pracę zamykają wspólne podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań.

Do rozprawy dołączono również wymagane streszczenie w języku angielskim. Dokument ten został udostępniony wraz z rozprawą w Biuletynie Informacji Publicznej Politechniki Świętokrzyskiej jako odrębny załącznik i zawiera syntetyczne przedstawienie celu, zakresu, zastosowanej metodyki oraz najważniejszych rezultatów pracy.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania formalne określone w art. 187 ust. 3 i 4 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

3. UWAGI I PYTANIA MERYTORYCZNE DOTYCZĄCE TREŚCI ROZPRAWY

Przedstawione poniżej uwagi i pytania mają przede wszystkim charakter doprecyzowujący i mogą stanowić podstawę dyskusji podczas publicznej obrony.

Rozdział 3 – „Metody pomiarów i analiz ekspozycji na drgania”

1. Jaka jest podstawa normatywna stosowania wskaźników VDV i RMQ do oceny drgań miejscowych HAV rejestrowanych na kierownicy? Czy w tym przypadku należy traktować je wyłącznie jako dodatkowe miary porównawcze, a nie jako wskaźniki normatywnej oceny ekspozycji? (s. 47–49, później również 90–96)

Rozdział 6 – „Badania eksperymentalne – pomiar drgań oddziałujących na motocyklistę w warunkach rzeczywistych”

1. Jaki przedział czasu wykorzystywano do obliczania wskaźników RMS, VDV i RMQ, skoro pojedyncze przejazdy trwały 30–60 s, natomiast dla analizy FFT wskazano próbkę 10-sekundową? W jaki sposób wybierano analizowany fragment i czy zweryfikowano jego reprezentatywność dla całego przejazdu? (s. 79, 86–98)
2. Jaką dodatkową informację, zdaniem Autora, wnosi równoczesne zastosowanie RMQ i VDV w analizach przedstawionych w rozdziale 6, skoro dla jednakowego czasu analizy zachodzi ścisła zależność $VDV = T^{1/4} \cdot RMQ$, a przedstawione wyniki wskazują, że przyjęto $T \approx 10$ s? (wtedy $VDV \approx 1,778 \cdot RMQ$). Czy bardziej zasadne nie byłoby wykorzystanie różnicy między RMS i RMQ do oceny impulsowości sygnału, a VDV do oceny efektu rzeczywistego czasu ekspozycji?

3. Z czego wynika pominięcie pomiaru drgań na podnóżkach, mimo że we wcześniejszej części rozprawy (s.36) wskazano stopy i podnóżki jako jedną z dróg transmisji drgań ogólnych do organizmu motocyklisty? Jaki może być wpływ tego ograniczenia na ocenę całkowitego oddziaływania drgań na kierowcę? (s. 77–78)
4. Jaka była masa kierowcy realizującego badania drogowe i czy analizowano jej wpływ na właściwości dynamiczne układu motocykl–kierowca oraz na możliwość uogólniania uzyskanych wyników? (s. 76–80)
5. Czy wykonano niezależną ilościową charakterystykę nierówności badanych nawierzchni, np. poprzez pomiar profilu drogi? Jeżeli nie, w jakim zakresie wyniki można odnosić do określonego „rodzaju nawierzchni”, a nie tylko do konkretnego badanego odcinka? (s. 78–79)
6. Jak należy rozumieć wnioski dotyczące bezpieczeństwa prowadzenia motocykla formułowane na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń? Czy bezpieczeństwo oznacza w tym przypadku ryzyko zdrowotne wynikające z ekspozycji na drgania, pogorszenie zdolności kierowcy do sterowania pojazdem, czy również zmianę właściwości dynamicznych motocykla? Jakie mierzone wielkości pozwalają każdą z tych interpretacji zweryfikować?
7. Czy podczas prób drogowych rejestrowano prędkość obrotową silnika i aktualne przełożenie? W jaki sposób bez tych informacji rozdzielono udział wymuszeń pochodzących od silnika, nawierzchni i drgań własnych konstrukcji w obserwowanych pasmach około 50–60 i 80–90 Hz? (s. 97–124)
8. Czy zweryfikowano wpływ sposobu zamocowania akcelerometru na kierownicy za pomocą taśmy na mierzoną odpowiedź częstotliwościową, szczególnie w zakresie około 80–90 Hz, któremu później przypisywane jest znaczenie fizyczne? (s. 77, 98–124)

Rozdział 7 – „Stanowiskowe badania eksperymentalne do oceny drgań”

1. W jakim stopniu sposób zamocowania motocykla na stanowisku zmienia jego warunki brzegowe względem jazdy rzeczywistej? Czy oszacowano wpływ dodatkowej sztywności, tarcia i bezwładności układu wodząco-prowadzącego na odpowiedź dynamiczną badanego obiektu? (s. 127–130)
2. W jaki sposób w badaniach stanowiskowych odwzorowano wpływ kół, opon i mas nieresorowanych występujących podczas jazdy rzeczywistej? Jak różnice w warunkach pracy tych elementów mogą wpływać na transmisję drgań w stosunku do badań drogowych? (s. 127–139)

Rozdział 8 – „Odwzorowanie drgań zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych na stanowisku badawczym”

1. Czy podczas laboratoryjnej replikacji zachowano wzajemne przesunięcie czasowe i relację fazową pomiędzy wymuszeniem przedniej i tylnej osi? W jaki sposób było to realizowane w procedurze Moog Replication? (s. 141–168)
2. Jaka masa i w jaki sposób obciążony był motocykl podczas procesu replikacji? Czy rozkład masy odpowiadał warunkom badań drogowych z udziałem rzeczywistego kierowcy? (s. 141–168; por. także s. 174)

Rozdział 9 – „Modyfikacja zawieszenia oraz manetek kierownicy”

1. Czy dla poszczególnych ustawień zawieszenia kontrolowano ugięcie statyczne, wysokość motocykla oraz wynikające z tego zmiany geometrii? Jeżeli nie, czy obserwowaną zmianę poziomu drgań można przypisywać wyłącznie zmianie właściwości sprężysto-tłumiących zawieszenia? (s. 169–170)
2. Czy określono właściwości dynamiczne materiałów zastosowanych do wykonania manetek, np. moduł dynamiczny lub współczynnik strat w funkcji częstotliwości? Sama twardość Shore’a nie opisuje jednoznacznie właściwości tłumiących materiału. (s. 171–173)

Rozdział 10 – „Metodyka modelowania i analiz numerycznych motocykla w badaniach drgań”

1. W jaki sposób formalnie rozdzielono dane wykorzystane do kalibracji modelu od danych przeznaczonych do jego walidacji? Czy pięć warunków nawierzchniowych niewykorzystanych przy pierwszej kalibracji można traktować jako niezależny zbiór walidacyjny? (s. 200–217, szczególnie s. 202–203)
2. Dlaczego opracowanego modelu numerycznego nie wykorzystano do analizy przynajmniej części modyfikacji zawieszenia przedstawionych eksperymentalnie w rozdziale 9? Czy takie porównanie nie pozwoliłoby na silniejsze powiązanie i wzajemną weryfikację eksperymentalnej i numerycznej części rozprawy? (s. 169–180 oraz 181–217)

Bibliografia.

1. Pozycje [73] i [80] wyglądają na zdublowanie tej samej publikacji — mają praktycznie ten sam tytuł i ten sam DOI.

Przedstawione uwagi nie podważają zasadniczej koncepcji rozprawy ani wartości uzyskanych wyników. Wskazują natomiast zakres informacji wymagających doprecyzowania oraz ograniczenia, które należy uwzględnić podczas interpretacji wyników i planowania dalszych badań.

4. PODSUMOWANIE KOŃCOWE I WNIOSK RECENZENTA

Szczegółowa analiza rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Podoska pt. „Analiza drgań motocykla ze względu na komfort i bezpieczeństwo kierowcy” pozwala stwierdzić, że stanowi ona wartościowy wkład w rozwój metod

eksperymentalnego i numerycznego badania drgań motocykli oraz oceny możliwości ograniczania ich oddziaływania na kierowcę.

Rozprawa w sposób spójny łączy badania prowadzone w rzeczywistych warunkach drogowych, laboratoryjne odtwarzanie zarejestrowanych wymuszeń, eksperymentalną ocenę modyfikacji konstrukcyjnych oraz modelowanie numeryczne motocykla. Najważniejszą wartością pracy jest **konsekwentne powiązanie kolejnych etapów postępowania badawczego: od wielopunktowej rejestracji drgań podczas jazdy, poprzez iteracyjne odwzorowanie wymuszeń drogowych na stanowisku laboratoryjnym i wykorzystanie ich do oceny zmian zawieszenia oraz manetek kierownicy, aż do opracowania i eksperymentalnej weryfikacji modelu numerycznego motocykla.**

Wkład rozprawy ma przede wszystkim charakter metodyczno-aplikacyjny. Nie polega on na opracowaniu nowej teorii dynamiki motocykla czy nowych metod analizy drgań, lecz na oryginalnym zestawieniu, rozwinięciu i eksperymentalnej weryfikacji znanych metod pomiarowych, stanowiskowych i numerycznych w ramach jednego spójnego procesu badawczego. **Wartość aplikacyjną pracy zwiększa wykorzystanie opracowanej metodyki do oceny konkretnych zmian konstrukcyjnych.**

Sformułowane w recenzji uwagi dotyczą przede wszystkim niejednoznacznego operacyjnego zdefiniowania komfortu i bezpieczeństwa kierowcy, wybranych aspektów metodyki i interpretacji analiz drganiowych, zakresu walidacji stanowiskowego odwzorowania wymuszeń oraz przyjętych uproszczeń i sposobu walidacji modelu numerycznego. Wskazano również pewne nieścisłości terminologiczne, redakcyjne i bibliograficzne. Ograniczenia te wpływają na zakres, w jakim można uogólniać niektóre wnioski rozprawy, w szczególności odnoszące redukcję poziomu drgań bezpośrednio do poprawy bezpieczeństwa motocyklisty, nie podważają jednak zasadniczej poprawności przyjętego toku badawczego, wartości uzyskanych wyników ani oryginalności rozwiązania problemu naukowego w jego wymiarze metodyczno-aplikacyjnym.

Pozytywnie należy również ocenić świadomość ograniczeń przeprowadzonych badań widoczną w przedstawionych kierunkach dalszych prac. Autor wskazuje m.in. potrzebę rozszerzenia badań na inne typy motocykli i nawierzchni, uwzględnienia reakcji fizjologicznych kierowcy, rozbudowy modelu numerycznego o bardziej złożoną reprezentację kierowcy, wykorzystania długoterminowej rejestracji danych oraz opracowania zintegrowanego wskaźnika komfortu drganiowego motocyklisty. Świadczy to o umiejętności krytycznej oceny zakresu wykonanych badań oraz identyfikowania problemów wymagających dalszego rozwiązania.

Podsumowując ustalenia szczegółowo przedstawione w punkcie 2 niniejszej recenzji, należy stwierdzić, że rozprawa spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w szczególności w art. 187 ust. 1–4, tj.:

- prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz potwierdza jego umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych i numerycznych, a także analizy i interpretacji ich wyników;
- przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o charakterze metodyczno-aplikacyjnym, polegające przede wszystkim na opracowaniu i weryfikacji zintegrowanej metodyki łączącej badania drogowe, stanowiskową replikację rzeczywistych wymuszeń, eksperymentalną ocenę modyfikacji konstrukcyjnych oraz modelowanie numeryczne motocykla;
- ma postać spójnej pracy pisemnej o charakterze monograficznym, w której kolejne części podporządkowano wspólnemu problemowi badawczemu i powiązano w jednolity ciąg obejmujący analizę stanu wiedzy, sformułowanie celów, badania eksperymentalne, badania stanowiskowe, analizę rozwiązań konstrukcyjnych oraz modelowanie i walidację numeryczną;
- spełnia wymagania formalne, w tym wymaganie dotyczące dołączenia streszczenia rozprawy w języku angielskim.

W konsekwencji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Podoska pt. „Analiza drgań motocykla ze względu na komfort i bezpieczeństwo kierowcy” spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1–4 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr. inż. Krzysztofa Podoska do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Poznań, 02.09.2026

dr hab. inż. Grzegorz Ślaski, prof. PP