



Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

# **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Krzysztof Podosek

## **ANALIZA DRGAŃ MOTOCYKLA ZE WZGLĘDU NA KOMFORT I BEZPIECZEŃSTWO KIEROWCY**

Promotor:

dr hab. inż. Marek Jaśkiewicz, prof. PŚk

Promotor pomocniczy:

dr inż. Andrzej Zuska

Kielce 2026



*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu dr hab. inż. Markowi Jaśkiewiczowi, prof. PŚk, Promotorowi niniejszej rozprawy doktorskiej, za życzliwe wsparcie, cenne wskazówki merytoryczne oraz nieocenioną pomoc na wszystkich etapach realizacji pracy. Dziękuję za poświęcony czas, inspirujące rozmowy oraz motywację do pogłębiania wiedzy i rozwijania umiejętności naukowych. Pańskie doświadczenie, zaangażowanie i otwartość miały kluczowy wpływ na ostateczny kształt niniejszej rozprawy.*

*Szczególne podziękowania kieruję również do Pana dr. inż. Andrzeja Zuski, Promotora pomocniczego, za stałą gotowość do pomocy, konstruktywne uwagi oraz wsparcie merytoryczne w trakcie prowadzenia badań i opracowywania wyników. Dziękuję za cenne sugestie, cierpliwość oraz życzliwą współpracę, które w istotny sposób przyczyniły się do powstania niniejszej pracy.*

*Wyrazy najgłębszej wdzięczności składam mojej żonie Sylwii oraz mojemu synowi Szymonowi za cierpliwość, wyrozumiałość oraz ogromne wsparcie okazywane mi przez cały okres realizacji rozprawy doktorskiej. Dziękuję za obecność, zrozumienie i motywację w chwilach wymagających szczególnego zaangażowania oraz za stworzenie atmosfery, która pozwalała mi konsekwentnie dążyć do wyznaczonego celu.*

*Szczególne podziękowania kieruję także do moich Rodziców, którym zawdzięczam wartości, pracowitość, wytrwałość oraz wiarę w sens podejmowanego wysiłku. Dziękuję za nieustanne wsparcie, życzliwość i dobre słowo, które towarzyszyły mi na wszystkich etapach mojej drogi naukowej i zawodowej.*

*Serdeczne podziękowania składam również całej mojej rodzinie oraz znajomym za okazywaną życzliwość, wsparcie i zrozumienie. Dziękuję za słowa otuchy, obecność oraz motywację, które pomagały mi w realizacji tego wymagającego przedsięwzięcia.*



## Spis treści

Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów .....	7
Streszczenie .....	9
1. Motocykl jako obiekt techniczny .....	13
1.1. Budowa motocykla i jego podzespołów .....	13
1.2. Budowa przedniego zawieszenia motocykla .....	18
1.3. Budowa tylnego zawieszenia .....	20
1.4. Nowoczesne rozwiązania amortyzatorów stosowanych w motocyklach.....	22
2. Drgania w transporcie .....	27
2.1. Motocykl jako źródło drgań .....	28
2.2. Wpływ drgań na komfort i bezpieczeństwo użytkowników .....	31
3. Metody pomiarów i analiz ekspozycji na drgania.....	39
3.1. Normy i podstawy oceny drgań .....	39
3.2. Pomiar drgań działających na kończyny górne.....	40
3.3. Pomiar drgań ogólnych i działających na stopy.....	43
3.4. Normy dopuszczalnych wartości drgań .....	45
3.5. Wskaźniki oceny drgań .....	47
4. Studium literatury naukowej .....	51
4.1. Przegląd dotychczasowych badań i metod pomiarowych stosowanych w analizie drgań motocykli oraz ekspozycji motocyklistów .....	51
4.2. Przegląd modeli symulacyjnych i analiz numerycznych dotychczasowych wykorzystywanych w ocenie komfortu wibracyjnego w motocyklu .....	58
4.3. Przegląd stanowisk badawczych do testów wibracyjnych motocykli.....	60
5. Cel i zakres pracy .....	69
5.1. Cel teoretyczny.....	69
5.2. Cel praktyczny .....	70
5.3. Uzasadnienie .....	70
5.4. Zakres pracy .....	71
5.5. Metodologia badawcza.....	71
6. Badania eksperymentalne - pomiar drgań oddziałujących na motocyklistę w warunkach rzeczywistych.....	75
6.1. Obiekt badań .....	76
6.2. Aparatura pomiarowa.....	77

6.3.	Warunki badań i przebieg pomiarów .....	78
6.4.	Analiza drgań oddziałujących na motocyklistę dziedzinie czasu .....	80
6.5.	Analiza drgań oddziałujących na motocyklistę w dziedzinie częstotliwości .....	97
7.	Stanowiskowe badania eksperymentalne do oceny drgań .....	125
8.	Odwzorowanie drgań zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych na stanowisku badawczym.....	141
8.1.	Metodyka odwzorowania drgań.....	142
8.2.	Iteracja systemu w oprogramowaniu Moog Replication .....	152
8.3.	Zestawienie wyników iteracji dla sześciu rodzajów nawierzchni .....	165
9.	Modyfikacja zawieszenia oraz manetek kierownicy.....	169
9.1.	Metodyka badań i procedura pomiarowa.....	173
9.2.	Analiza wpływu modyfikacji na drgania, komfort i bezpieczeństwo motocyklisty .....	175
10.	Metodyka modelowania i analiz numerycznych motocykla w badaniach drgań .....	181
10.1.	Budowa struktury graficznej modelu motocykla w SolidWorks .....	183
10.2.	Przygotowanie modelu motocykla Yamaha XV 125 do symulacji w LS-DYNA .....	189
10.3.	Przeprowadzenie symulacji motocykla Yamaha XV 125 w LS-DYNA .....	200
10.4.	Analiza wyników symulacji dla różnych rodzajów nawierzchni .....	203
	Podsumowanie i wnioski.....	219
	Kierunki dalszych badań .....	225
	Bibliografia .....	227
	Spis tabel .....	235
	Spis rysunków .....	237

## Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów

Oznaczenie	Nazwa	Jednostka podstawowa
x	Przyspieszenie wzdłużne	$m/s^2$
y	Przyspieszenie poprzeczne	$m/s^2$
z	Przyspieszenie pionowe	$m/s^2$
t	Czas	s
HAVS	Hand-Arm Vibration Syndrome – zespół wibracyjny kończyn górnych	-
EAV	Exposure Action Value – wartość działania narażenia na drgania ogólne	$m/s^2$
WBV	Whole-Body Vibration – drgania całego ciała	-
RMS	Root Mean Square – wartość skuteczna intensywności drgań oddziałujących na ciało człowieka	$m/s^2$
VDV	Vibration Dose Value – wskaźnik określający ekspozycję człowieka na drgania, uwzględniający zarówno amplitudę, jak i czas trwania drgań	$m/s^{1.75}$
RMQ	Root Mean Quad – wskaźnik drgań o wyższych wartościach amplitud	-



## Streszczenie

Niniejsza praca doktorska koncentruje się na zagadnieniu drgań oddziałujących na motocyklistę podczas jazdy oraz na możliwościach ich pomiaru, analizy i ograniczania. Głównym celem prowadzonych badań jest zrozumienie mechanizmów powstawania drgań w motocyklu, określenie ich wpływu na komfort oraz bezpieczeństwo użytkowników, a także opracowanie i weryfikacja praktycznych rozwiązań konstrukcyjnych w obszarze zawieszenia oraz układu kierowniczego, ukierunkowanych na redukcję niekorzystnych oddziaływań wibracyjnych.

W początkowej części rozprawy przedstawiono kontekst podjętej problematyki, definiując cele naukowe i praktyczne pracy, uzasadniając wybór tematu badawczego oraz omawiając przyjętą metodykę badań. Taki układ umożliwi czytelnikowi zapoznanie się zarówno z naukowymi podstawami prowadzonych analiz, jak i z ich aplikacyjnym charakterem oraz znaczeniem praktycznym w obszarze transportu motocyklowego.

Następnie zaprezentowano motocykl jako złożony obiekt techniczny, ze szczególnym uwzględnieniem budowy i zasad działania zawieszenia przedniego i tylnego. Omówiono również nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne stosowane w amortyzatorach, wskazując ich rolę w kształtowaniu charakterystyki dynamicznej pojazdu. Przedstawione tło konstrukcyjne pozwala na lepsze zrozumienie, w jaki sposób poszczególne elementy motocykla wpływają na powstawanie oraz poziom drgań przenoszonych na kierowcę.

Kolejna część pracy poświęcona została zagadnieniom drgań w transporcie, ze szczególnym uwzględnieniem motocykli jako źródła drgań

mechanicznych. Przedstawiono wpływ wibracji na komfort oraz bezpieczeństwo użytkowników, odwołując się do wyników badań krajowych i zagranicznych. Na tej podstawie zidentyfikowano istniejące luki w stanie wiedzy oraz w metodyce pomiaru drgań oddziałujących na motocyklistów, a także omówiono dotychczasowe sposoby ograniczania negatywnych skutków drgań.

W rozprawie zawarto również szczegółowy przegląd metod pomiaru i analizy ekspozycji na drgania, obejmujący zarówno rozwiązania techniczne, takie jak urządzenia do rejestracji przyspieszeń drgań, jak i procedury analityczne stosowane do oceny ich oddziaływania na organizm człowieka. Omówiono również obowiązujące normy oraz kryteria wyznaczania dopuszczalnych poziomów narażenia na drgania, co stanowi istotny element oceny komfortu i bezpieczeństwa użytkowników motocykli.

W dalszej części pracy przedstawiono badania eksperymentalne prowadzone w warunkach rzeczywistych, obejmujące rejestrację sygnałów drgań na kierownicy i siedzisku motocykla oraz ich analizę w dziedzinie czasu i częstotliwości. Uzyskane wyniki pomiarów posłużyły następnie do odwzorowania zarejestrowanych drgań w warunkach laboratoryjnych, na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym. Zastosowanie iteracyjnego podejścia umożliwiło stopniowe dopasowanie parametrów stanowiska w taki sposób, aby wiernie odtwarzało ono zachowanie motocykla podczas jazdy po różnych rodzajach nawierzchni drogowych.

Kolejny fragment rozprawy poświęcono modyfikacjom zawieszenia oraz układu kierowniczego motocykla, których celem była minimalizacja oddziaływania drgań na motocyklistę. Przedstawione rozwiązania mają charakter autorski i obejmują różne warianty konstrukcyjne, których

skuteczność oceniono na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów i analiz. Zaprezentowano wpływ poszczególnych modyfikacji na poziom drgań oraz komfort i bezpieczeństwo jazdy.

W pracy omówiono również proces modelowania motocykla w środowisku CAD (SolidWorks) oraz przeprowadzania analiz numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania LS-DYNA. Na przykładzie motocykla Yamaha XV 125 zaprezentowano pełny proces tworzenia modelu wirtualnego pojazdu, definiowania właściwości materiałowych oraz realizacji symulacji dynamicznych. Wyniki analiz numerycznych porównano z danymi uzyskanymi w badaniach rzeczywistych, co umożliwiło weryfikację skuteczności zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych oraz poprawność przyjętych założeń modelowych.

Końcowa część rozprawy zawiera dyskusję uzyskanych wyników, w której zestawiono obserwacje pochodzące zarówno z badań eksperymentalnych, jak i z symulacji komputerowych. Omówiono implikacje wprowadzonych modyfikacji dla komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty, a także wskazano potencjalne kierunki dalszych badań w obszarze analizy drgań motocykli.

Całość pracy została podsumowana wnioskami końcowymi, w których oceniono stopień realizacji postawionych celów badawczych oraz wskazano możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych rezultatów. Rozprawę uzupełniają liczne odwołania do literatury naukowej, a także spisy tabel i rysunków, umożliwiające weryfikację wyników oraz pogłębione zrozumienie przedstawionych analiz.



# **1. Motocykl jako obiekt techniczny**

Motocykl jest złożonym układem mechanicznym, w którym zachodzą dynamiczne interakcje pomiędzy elementami konstrukcyjnymi pojazdu, nawierzchnią drogi oraz kierowcą. Zrozumienie tych zależności jest kluczowe dla analizy drgań wpływających na komfort i bezpieczeństwo użytkownika.

W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze aspekty budowy motocykla – ze szczególnym uwzględnieniem układu zawieszenia i elementów tłumiących, które stanowią podstawowe ogniwo w przenoszeniu drgań. Omówiono również aktualne rozwiązania konstrukcyjne stosowane w nowoczesnych motocyklach, stanowiące punkt wyjścia do dalszej analizy eksperymentalnej i symulacyjnej.

## **1.1. Budowa motocykla i jego podzespołów**

Pomimo wieloletniego rozwoju motocykli, ich ogólna koncepcja konstrukcyjna pozostaje zbliżona do pierwotnych rozwiązań. Współczesne konstrukcje różnią się jednak pod względem przeznaczenia, masy, sztywności oraz charakterystyki dynamicznej. Najczęściej wyróżnia się motocykle klasyczne, sportowe, turystyczne, enduro, choppersy oraz skutery. O ich właściwościach decydują m.in. geometria ramy, typ zawieszenia, masa własna, pojemność skokowa silnika oraz rodzaj układu napędowego [1], [2].

Postęp techniczny, specjalizacja oraz wieloletnie doświadczenia w eksploatacji motocykli doprowadziły do wyodrębnienia kilku podstawowych typów pojazdów jednośladowych, różniących się pod względem budowy i zastosowania. Na rysunku 1.1 przedstawiono klasyfikację motocykli, obejmującą: skutery, motocykle klasyczne, naked, sportowe, turystyczne, turystyczno-sportowe, choppersy, enduro oraz

wyścigowe. O ich przeznaczeniu decydują rozwiązania konstrukcyjne, wyposażenie, pojemność i rodzaj silnika, moc jednostki napędowej oraz układ przeniesienia napędu [3], [4].



**Rys. 1.1** Klasyfikacja motocykli [5]

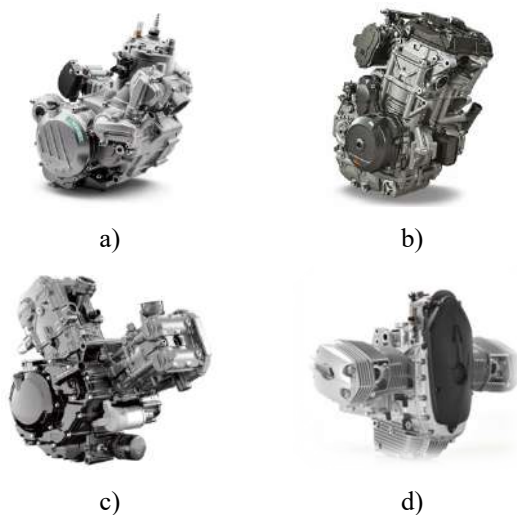
a – skuter, b – klasyczny, c – naked, d – sportowy, e – turystyczny, f – turystyczno-sportowy, g – chopper, h – enduro, i – wyścigowy

W motocyklach wykorzystywane są dwa podstawowe typy silników: dwusuwowe i czterosuwowe. Silniki dwusuwowe występują głównie w starszych konstrukcjach oraz skuterach, natomiast czterosuwowe dominują

we współczesnych motocyklach ze względu na większą trwałość i wyższą kulturę pracy.

Ze względu na układ cylindrów i budowę jednostki napędowej można wyróżnić:

- silniki jednocylindrowe (rys. 1.2 a), stosowane najczęściej w motocyklach typu enduro, gdzie szczególne znaczenie ma niska masa,
- silniki rzędowe (rys. 1.2 b), z dwoma do sześciu cylindrów – najczęściej spotykane we współczesnych konstrukcjach,
- silniki widlaste (V) (rys. 1.2 c), wykorzystywane w motocyklach klasycznych, turystycznych i typu chopper, charakteryzujące się wysokim momentem obrotowym i ograniczonymi drganiami,
- silniki typu bokser (rys. 1.2 d), o przeciwległych cylindrach – stosowane głównie przez markę BMW, cechujące się niskim poziomem hałasu i drgań.



**Rys. 1.2** Rodzaje jednostek napędowych występujących w motocyklach [5], [6], [7]  
a – jednocylindrowy, b – rzędowy, c – widlasty, d – bokser

W większości motocykli stosowany jest silnik czterosuwowy, który stanowi część nośną i usztywniającą ramę pojazdu. Wraz ze sprzęgłem i przekładnią tworzy zwartą konstrukcję. Cechą charakterystyczną jednostek motocyklowych, szczególnie w wersjach sportowych, jest niska elastyczność oraz osiąganie maksymalnej mocy przy wysokich prędkościach obrotowych, wynoszących od 7000 do 13 000 obr./min.

Moment obrotowy przenoszony jest na tylne koło za pomocą łańcucha, paska zębatego lub wału Kardana. W przypadku silników ustawionych poprzecznie możliwe jest zastosowanie wszystkich tych rozwiązań, natomiast w układach wzdłużnych napęd realizowany jest wyłącznie poprzez wał Kardana [3].

Na rysunku 1.3 przedstawiono elementy motocykla, które w sposób bezpośredni przenoszą drgania na kierowcę i pasażera, natomiast rysunek 1.4 przedstawia komponenty generujące drgania oraz przekazujące je z nawierzchni drogi.



**Rys. 1.3** Elementy motocykla przenoszące drgania na kierowcę oraz pasażera [8]



**Rys. 1.4** Elementy motocykla generujące oraz przenoszące drgania z nawierzchni drogi [8]

Specyfika budowy motocykla sprawia, że wiele rozwiązań stosowanych w pojazdach samochodowych nie może być bezpośrednio przeniesionych do konstrukcji jednośladowych [9], [10]. Ograniczona przestrzeń w obrębie ramy oraz konieczność zachowania niskiej masy utrudniają montaż dodatkowych elementów i systemów tłumienia drgań. W konsekwencji drgania generowane przez silnik, układ przeniesienia napędu czy zawieszenie są w znacznym stopniu przenoszone na konstrukcję motocykla i ciało kierowcy.

Motocykl stanowi złożony układ dynamiczny, w którym wzajemne oddziaływania między elementami konstrukcyjnymi – ramą, zawieszeniem, silnikiem i układem napędowym – decydują o poziomie drgań przenoszonych na użytkownika [11].

Analiza budowy motocykla wykazała, że największy wpływ na komfort jazdy mają:

- typ i konstrukcja zawieszenia (sztywność, charakterystyka tłumienia),
- sposób mocowania silnika oraz sztywność ramy,

- zastosowanie systemów mechatronicznych ograniczających wibracje.

Zrozumienie zasad działania tych układów stanowi podstawę do opracowania modelu dynamicznego motocykla oraz przeprowadzenia analizy drgań wpływających na komfort i bezpieczeństwo kierowcy. Kwestie te omówiono szczegółowo w kolejnych rozdziałach pracy.

## 1.2. Budowa przedniego zawieszenia motocykla

Zadaniem zawieszenia jest tłumienie drgań wywołanych nierównościami nawierzchni oraz utrzymywanie ciągłego kontaktu kół z drogą [12]. W motocyklach, ze względu na konstrukcję, zawieszenie pełni również funkcję układu kierowniczego. Kolumny resorujące połączone półkami tworzą tzw. widelec, który prowadzi koło jezdne. Całość jest mocowana w główce ramy.

W odróżnieniu od samochodów, układ kierowniczy motocykla nie posiada przekładni ani wspomagania, co powoduje, że kierowca silnie odczuwa drgania przenoszone na ręce. Na rysunku 1.5 zostały przedstawione najczęściej spotykane rozwiązania konstrukcyjne przedniego zawieszenia w motocyklach.



**Rys. 1.5** Motocykle z typowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi przedniego zawieszenia [8], [13], [14]

a – teleskopowe, b – na wahaczu pchanym, c – na wahaczu wleczonym

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem przedniego zawieszenia jest widelec teleskopowy, w wersji klasycznej (rys. 1.6 a) lub Upside-down (rys. 1.6 b) [9], [10]. Klasyczny widelec charakteryzuje się lekką konstrukcją i łatwością regulacji geometrii przodu motocykla. Podczas hamowania dochodzi jednak do skrócenia teleskopu („nurkowania”), co zmienia kąt główki ramy i pogarsza manewrowanie. W wersji Upside-down, dzięki odwróceniu układu i zwiększeniu średnicy elementów w górnej części, uzyskuje się większą sztywność i odporność na zginanie [3].

Wahacze pchane (rys. 1.5 b), popularne były 80 lat temu, lecz spotykane są nadal w pojazdach marki Harley-Davidson. Niektóre skutery wyposażone są nadal w wahacze wleczone (rys. 1.5 c). Zawieszenia wahaczowe zwiększają komfort poruszania się motocyklami, lecz utrudniają prowadzenie ich przy większych prędkościach, gdyż podwozie motocykla ma wówczas większą tendencję do wpadania w drgania harmoniczne.



a)



b)

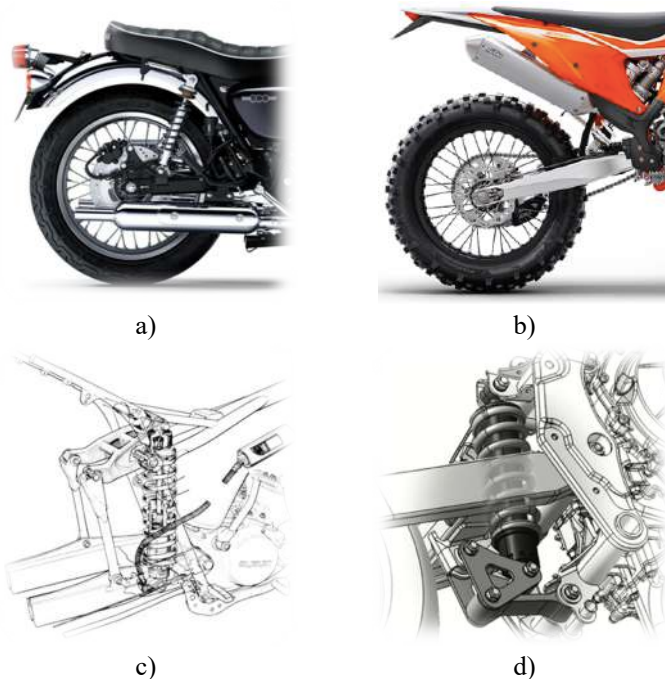
**Rys. 1.6** Rozwiązania stosowane w przednim zawieszeniu teleskopowym [8]  
a – widelec teleskopowy klasyczny, b – widelec teleskopowy Upside-down

Nowoczesne zawieszenia teleskopowe umożliwiają regulację napięcia wstępnego sprężyny śrubowej, a także zastosowanie systemów mechatronicznych, które automatycznie dostosowują twardość zawieszenia w zależności od ciśnienia w układzie hamulcowym. Wraz ze wzrostem siły nacisku na dźwignię hamulca zwiększa się twardość teleskopów, co ogranicza ugięcie zawieszenia.

### **1.3. Budowa tylnego zawieszenia**

Zawieszenie tylne odpowiada za tłumienie drgań generowanych przez nierówności nawierzchni. W nowoczesnych konstrukcjach motocykli stosuje się różne rozwiązania, m.in.:

- wleczony wahacz dwuramienny wsparty na dwóch amortyzatorach (rys. 1.7 a),
- wleczony wahacz dwuramienny wsparty na jednym centralnie zamontowanym amortyzatorze (rys. 1.7 b),
- system Full Floster, w którym amortyzator połączony jest z wahaczem poprzez układ dźwigni i łączników (rys. 1.7 c),
- systemy Pro-Link, Uni-Track i inne, charakteryzujące się zwartą i progresywną pracą zawieszenia (rys. 1.7 d).



**Rys. 1.7** Rozwiązania konstrukcyjne tylnego zawieszania w motocyklach [5], [8], [15], [16]  
 a – wahacz z dwoma amortyzatorami, b – wahacz z jednym amortyzatorem, c – system Full Floster, d – system Pro-Link

Wahacze z dwoma amortyzatorami stosowane od lat 50. XX wieku zapewniały wysoką nośność i możliwość regulacji wstępnego napięcia sprężyn. Wraz z rozwojem konstrukcji zastąpiono je wahaczem z jednym amortyzatorem centralnym, co poprawiło symetrię obciążenia. Z kolei systemy dźwigniowe (Pro-Link, Uni-Track, Full Floster) umożliwiły uzyskanie progresywnej charakterystyki pracy zawieszania i lepsze tłumienie drgań [17].

Wahacze wykonywane są ze stali, aluminium lub stopów lekkich. W motocyklach sportowych stosuje się konstrukcje przestrzenne o zwiększonej sztywności. Najczęściej stosowanym typem tłumienia jest układ olejowy lub gazowo-olejowy, w którym elementem resorującym jest sprężyna śrubowa.

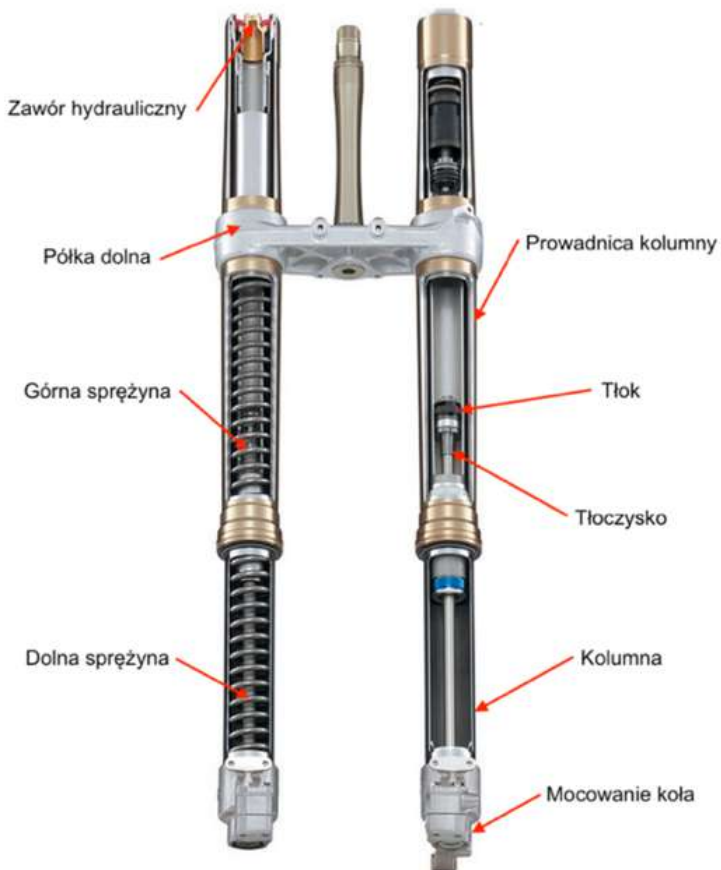
## **1.4. Nowoczesne rozwiązania amortyzatorów stosowanych w motocyklach**

Postęp w technologii zawiesznień motocyklowych koncentruje się na poprawie komfortu i bezpieczeństwa jazdy poprzez skuteczniejsze tłumienie drgań. Amortyzatory stanowią kluczowy element układu resorująco-tłumiącego [18], [19].

W aktualnie produkowanych motocyklach stosuje się dwa podstawowe typy zawieszenia:

- klasyczne, bez regulacji,
- premium, umożliwiające regulację wysokości położenia zawieszenia, napięcia wstępnego sprężyn (w zależności od obciążenia – jazda w pojedynkę, z pasażerem lub bagażem) oraz charakterystyki tłumienia dostosowanej do stylu jazdy.

Przednie klasyczne amortyzatory w motocyklach (rys. 1.8) mocowane są w żeliwnych lub aluminiowych półkach łożyskowych w główce ramy. Głównymi elementami zawieszenia przedniego teleskopowego jest kolumna oraz prowadnica. Gdy pojazd porusza się po przeszkodzie, tłok porusza się w dolnym kierunku ściskając tym samym dolną sprężynę oraz zwiększając ciśnienie w dolnej komorze. Wzrost ciśnienia powoduje przemieszczanie się płynu z dolnej komory do górnej przez zawory tłumiące umieszczone w tłoku. Powoduje to zwiększenie ciśnienia w górnej komorze amortyzatora cylindra. W momencie odbicia mocowanie koła porusza się w dół powodując spadek ciśnienia w dolnej komorze. W tym czasie płyn z górnej komory przepływa do dolnej. Ruch płynu hydraulicznego przez zawory amortyzatorów powoduje tłumienie drgań [20].



**Rys. 1.8** Budowa przedniego zawieszenia teleskopowego [21]

W motocyklach stosuje się sprężyny o charakterystyce liniowej (rys. 1.9 a) oraz progresywnej (rys. 1.9 b). Sprężyny progresywne charakteryzują się zmienną sztywnością, co pozwala na płynne dostosowanie tłumienia do warunków jazdy.



a)

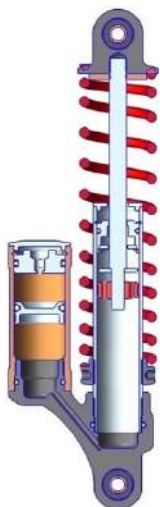


b)

**Rys. 1.9** Typy sprężyn wykorzystywanych w motocyklach [22], [23]  
a – liniowe, b – progresywne

Coraz częściej wykorzystuje się również sprężyny gazowe, których charakterystyka wynika z prawa Boyle'a-Mariotte'a – wzrost ciśnienia w cylindrze wraz z ruchem tłoka zwiększa siłę sprężystości. Zaletą tego typu rozwiązań jest możliwość regulacji parametrów pracy oraz stabilność działania w szerokim zakresie temperatur [24].

W nowoczesnych konstrukcjach stosuje się amortyzatory gazowo-olejowe z zewnętrznym zbiornikiem gazu (rys. 1.10), które kompensują zmiany objętości czynnika roboczego wynikające ze zmian temperatury. Dzięki temu amortyzator utrzymuje stabilne właściwości tłumiące niezależnie od warunków eksploatacyjnych [25], [26].



**Rys. 1.10** Zespół sprężysto-tłumiący z amortyzatorem gazowo-olejowym [25]

Ograniczeniem współczesnych układów zawieszenia jest utrudniona diagnostyka. Kontrola optyczna pozwala jedynie wykryć nieszczelności, natomiast pełna ocena stanu technicznego wymaga badań laboratoryjnych [24].

Motocykl jako obiekt techniczny stanowi złożony układ dynamiczny, w którym wzajemne oddziaływania elementów konstrukcyjnych decydują o poziomie drgań przenoszonych na kierowcę.

Analiza budowy motocykla wykazała, że największy wpływ na komfort jazdy mają:

- typ i konstrukcja zawieszenia (sztywność, charakterystyka tłumienia),
- sposób mocowania silnika oraz sztywność ramy,
- zastosowane systemy mechatroniczne redukujące wibracje.

Zrozumienie zasad działania poszczególnych układów stanowi podstawę do opracowania modelu dynamicznego motocykla oraz analizy drgań wpływających na komfort i bezpieczeństwo użytkownika. Zagadnienia te zostały rozwinięte w kolejnych rozdziałach pracy.



## 2. Drgania w transporcie

Drgania mechaniczne stanowią jedno z głównych zagrożeń środowiskowych związanych z transportem. Zjawisko to podlega kontroli i ograniczeniom poprzez wprowadzanie regulacji prawnych mających na celu redukcję poziomu wibracji generowanych przez przemysł, infrastrukturę oraz środki transportu. W ostatnich latach obserwuje się istotny wpływ tych regulacji na obniżenie emisji drgań, szczególnie w obszarze miejskim.

Rozwój techniczny współczesnych środków transportu, ukierunkowany na zwiększenie komfortu dynamicznego, przyczynia się do zmniejszenia poziomu oddziaływań wibracyjnych odczuwanych przez kierowców i pasażerów.

Emisja drgań stanowi również czynnik ryzyka zdrowotnego. Długotrwała ekspozycja na wibracje może prowadzić do pogorszenia funkcji fizjologicznych organizmu człowieka. Wyniki badań krajowych i zagranicznych ośrodków naukowych wskazują, że zarówno zakres amplitud, jak i częstotliwości drgań wpływa na reakcje organizmu. Szczególnie niebezpieczne są drgania o niskich częstotliwościach (4–8 Hz), które mogą powodować dysfunkcje narządów wewnętrznych [27], [28].

Wśród środków transportu bezpośrednio oddziałujących na użytkowników szczególne miejsce zajmują motocykle. Bliski kontakt kierowcy z elementami konstrukcyjnymi pojazdu powoduje, że generowane drgania są bezpośrednio przenoszone na ciało motocyklisty i pasażera, co ma istotne znaczenie dla komfortu oraz bezpieczeństwa jazdy.

## 2.1. Motocykl jako źródło drgań

Motocykl, ze względu na niewielką masę i zwartą konstrukcję, generuje znaczne drgania wynikające z pracy silnika spalinowego oraz stałego kontaktu układu jezdnego z nierównościami drogi. W przeciwieństwie do samochodów osobowych, ograniczona przestrzeń konstrukcyjna motocykla uniemożliwia zastosowanie rozbudowanych systemów tłumienia drgań. W konsekwencji większość źródeł wibracji przenosi się bezpośrednio na ręce, nogi i tułów kierowcy oraz na elementy strukturalne pojazdu [29], [30], [31].

Motocykl znajdujący się w ruchu emituje drgania pochodzące głównie od:

- pracy silnika i układu napędowego,
- oporów aerodynamicznych,
- warunków drogowych,
- drgań rezonansowych elementów konstrukcyjnych,
- toczenia się kół po nawierzchni jezdni.

W motocyklach wyposażonych w konwencjonalne silniki spalinowe dominującym źródłem drgań jest jednostka napędowa. Intensywność i charakter tych drgań zależą od liczby i układu cylindrów, pojemności skokowej, zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie wyważenia oraz charakterystyki pracy silnika, w tym zmiennych faz obciążenia.

Poza ruchem tłoka i korbowodu istotną rolę w generowaniu drgań odgrywa również układ rozrządu. Luzy zaworowe oraz współpraca krzywek wałka rozrządu z popychaczami mogą powodować metaliczne wibracje

i stuki, szczególnie słyszalne przy wyższych prędkościach obrotowych silnika [32], [33].

Podczas procesu spalania paliwa występują gwałtowne zmiany ciśnienia w komorze spalania, które bezpośrednio wpływają na poziom wibracji jednostki napędowej. Niekorzystne warunki spalania, takie jak nieprawidłowy kąt wyprzedzenia zapłonu, zbyt uboga lub zbyt bogata mieszanka paliwowo-powietrzna, mogą dodatkowo zwiększać amplitudę drgań, prowadząc do wzrostu hałasu i przyspieszonego zużycia elementów konstrukcyjnych [34].

Poniżej scharakteryzowano wymienione źródła drgań pochodzące z:

- Pracy silnika i układu napędowego

Zmienne siły w układzie korbowo-tłokowym, drgania układu rozrządu (luzy zaworowe, współpraca krzywek z popychaczami), dynamiczne obciążenia w skrzyni biegów i przekładniach oraz niewyważenie elementów wirujących, takich jak wał korbowy czy sprzęgło, stanowią podstawowe źródło wibracji jednostki napędowej i układu przeniesienia napędu [32], [35].

- Oporów aerodynamicznych

Turbulencje powietrza opływającego elementy motocykla, w szczególności owiewki, zbiornik paliwa oraz kask kierowcy, mogą powodować wibracje o charakterze wysokoczęstotliwościowym. Zawirowania aerodynamiczne zwłaszcza w motocyklach sportowych, przy dużych prędkościach przenoszą się na kierownicę i elementy karoserii, wpływając na odczuwany komfort jazdy [29].

- Warunków drogowych

Nierówności nawierzchni, takie jak progi zwalniające, uskoki czy wyboje, wywołują krótkotrwałe impulsy dynamiczne przenoszone przez układ zawieszenia. Charakter nawierzchni (asfalt, kostka brukowa, szuter) oraz styl jazdy (gwałtowne przyspieszanie, hamowanie, zmiana toru ruchu) mają istotny wpływ na częstotliwość i amplitudę drgań [29], [36], [37].

- Drgań rezonansowych elementów nadwozia i podwozia

Każdy element motocykla, taki jak rama, wahacz, kierownica czy owiewki, posiada własną częstotliwość drgań własnych. Gdy częstotliwość wymuszenia zewnętrznego (np. od pracy silnika) pokryje się z częstotliwością rezonansową danego elementu, następuje zjawisko rezonansu. Skutkuje ono gwałtownym wzrostem amplitudy drgań, co może prowadzić do uszkodzeń konstrukcyjnych lub pogorszenia stabilności jazdy [33].

- Toczenia się kół po nawierzchni jezdni

Drgania generowane przez opony są wynikiem niewyważenia kół, nieregularnego zużycia bieżnika lub niewłaściwego ciśnienia w ogumieniu. Dodatkowe wymuszenia wibracyjne mogą powstawać w układzie napędowym, zwłaszcza przy zbyt dużych luzach lub niewłaściwym napięciu łańcucha w motocyklach z napędem łańcuchowym [29].

Rozpoznanie i zrozumienie źródeł drgań w motocyklu stanowi kluczowy etap procesu projektowania pojazdu oraz oceny jego komfortu i bezpieczeństwa eksploatacji. Identyfikacja dominujących źródeł wibracji – takich jak silnik, układ przeniesienia napędu czy elementy podwozia i nadwozia – umożliwi wprowadzenie rozwiązań konstrukcyjnych ograniczających drgania, m.in. poprzez:

- zastosowanie wałków wyrównowazających,

- amortyzatorów drgań skrętnych,
- elastycznych mocowań silnika,
- wkładek gumowych i innych elementów wibroizolacyjnych.

Odpowiednia modyfikacja konstrukcji pozwala na redukcję poziomu drgań odczuwanych przez kierowcę, co bezpośrednio przekłada się na poprawę komfortu jazdy oraz zwiększenie bezpieczeństwa użytkownika motocykla.

## **2.2. Wpływ drgań na komfort i bezpieczeństwo użytkowników**

Drgania mechaniczne towarzyszą pracy wielu maszyn i urządzeń wykorzystywanych przez człowieka. W niektórych przypadkach stanowią one zjawisko pożądane, ułatwiające realizację określonych procesów technologicznych. Przykładem są koparki, wiatraki, zagęszczarki czy maszyny oczyszczające. W większości przypadków jednak drgania mechaniczne oddziałują negatywnie na organizm człowieka. Ich głównymi źródłami są procesy spalania, luzy i niewyważenia elementów wirujących oraz nierówności nawierzchni. Bezpośredni kontakt organizmu z drgającą maszyną może prowadzić do zaburzeń fizjologicznych, a przy długotrwałej ekspozycji – do trwałych zmian chorobowych [38], [39], [40].

Motocykle należą do złożonych pojazdów, w których drgania są w znacznym stopniu przenoszone na ciało kierowcy [41]. Wibracje powstające podczas eksploatacji motocykla, w zależności od amplitudy, częstotliwości oraz czasu działania, mogą negatywnie wpływać na organizm człowieka [27], [42]. Skutkiem długotrwałego oddziaływania drgań są zaburzenia w układzie naczyniowym, nerwowym, mięśniowym, kostno-

stawowym, a także reakcje psychofizyczne [43]. Drgania o dużej intensywności, występujące podczas przejazdu przez przeszkody drogowe, takie jak progi zwalniające czy tory kolejowe, mogą prowadzić do utraty panowania nad pojazdem, urazów ciała, a nawet śmierci. Z kolei drgania o umiarkowanej intensywności, lecz występujące często, są odczuwane jako nieprzyjemne i powodują zmęczenie oraz spadek koncentracji, co obniża efektywność prowadzenia pojazdu [44], [45], [46].

Narażenie organizmu człowieka na drgania zależy od miejsca ich przenikania do ciała [38], [47]. Wyróżnia się dwa podstawowe typy drgań:

- drgania miejscowe – działające przez kończyny górne,
- drgania ogólne – przenikające do organizmu przez pośladki, miednicę, plecy i nogi.

Na drgania miejscowe narażeni są przede wszystkim operatorzy maszyn oraz kierowcy pojazdów, którzy utrzymują bezpośredni kontakt z elementami sterującymi, takimi jak kierownice czy dźwignie [48].

Drgania ogólne dotyczą osób wykonujących pracę w pozycji siedzącej lub stojącej, w tym kierowców pojazdów transportowych i motocyklistów [40].

Szczególnie niebezpieczne dla organizmu człowieka są drgania o częstotliwościach równych lub zbliżonych do częstotliwości rezonansowych poszczególnych narządów. W takich przypadkach dochodzi do zjawiska rezonansu, które może prowadzić do trwałych uszkodzeń organów wewnętrznych [28]. W tabeli 2.1 przedstawiono przykładowe częstotliwości rezonansowe narządów i części ciała człowieka oraz potencjalne skutki ich przekroczenia. Na przykładzie motocyklisty zostały przedstawione częstotliwości drgań własnych narządów i części ciała człowieka (rys. 2.1).

**Tabela 2.1** Wybrane częstotliwości rezonansowe elementów ciała człowieka i potencjalne dysfunkcje [49]

Narząd lub część ciała	Częstotliwość drgań własnych [Hz]	Potencjalne dysfunkcje
Głowa	4 ÷ 25	bóle, zawroty głowy, zaburzenia równowagi
Narządy jamy brzusznej	4,5 ÷ 10	wibracje narządów, bóle, mdłości
Klatka piersiowa	5 ÷ 11	zaburzenia oddychania, uczucie ucisku
Górna część tułowia	4 ÷ 5	bóle kręgosłupa, napięcie mięśni
Dolna część tułowia	4 ÷ 6 oraz 20 ÷ 30	bóle stawów, mięśni, deformacja postawy
Kończyny dolne	ok. 5	bóle stawów, napięcie mięśni, zaburzenia krążenia
Kończyny górne	4 ÷ 5	bóle stawów, napięcie mięśni, zmniejszona sprawność manualna

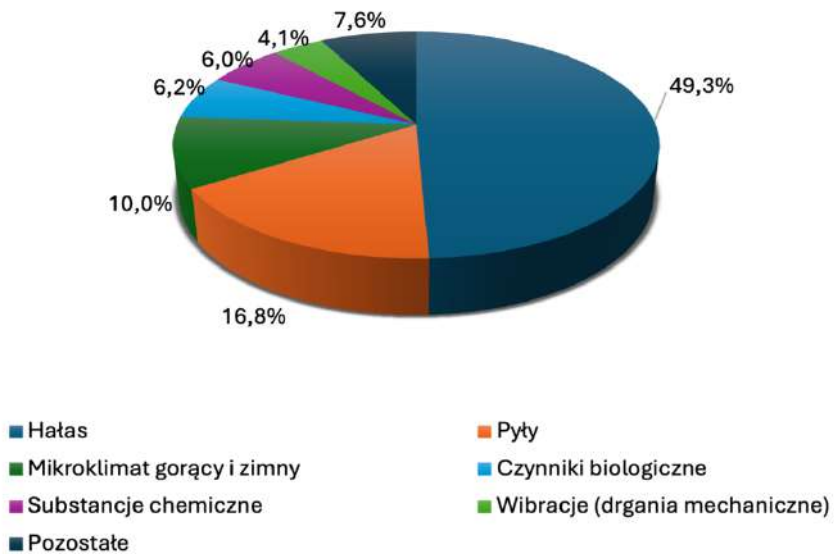


**Rys. 2.1** Wybrane częstotliwości rezonansowe narządów i części ciała człowieka [50]

Wyniki badań epidemiologicznych wskazują, że długotrwała ekspozycja na drgania prowadzi do powstawania zmian chorobowych

w układach naczyniowym, nerwowym i kostno-stawowym. Zespół tych zaburzeń, określany mianem zespołu wibracyjnego, został uznany w Polsce i wielu innych krajach za chorobę zawodową. Według danych statystycznych z 2025 roku, w warunkach narażenia na drgania mechaniczne pracuje około 4,1% społeczeństwa [51].

Na rysunku 2.2 zostały przedstawione zagrożenia związane ze środowiskiem pracy według czynników szkodliwych i niebezpiecznych oraz uciążliwych dla zdrowia w 2025 r.



**Rys. 2.2** Procentowy udział zatrudnionych w warunkach zagrożenia związanego ze środowiskiem pracy w 2025 r. [51]

Narażenie kończyn górnych na drgania miejscowe prowadzi do zmian chorobowych w układach krążenia, nerwowym i kostno-stawowym. W układzie naczyniowym obserwuje się zaburzenia krążenia w palcach dłoni, wynikające ze skurczów obwodowych naczyń krwionośnych.

Objawem jest blednięcie palców, zwane potocznie chorobą białych palców (rys. 2.3). W początkowej fazie schorzenie obejmuje pojedyncze palce, a w dalszym stadium rozszerza się na całą dłoń. Napady mogą trwać od kilku minut do ponad godziny, a towarzyszy im utrata czucia i sprawności manualnej [52].



**Rys. 2.3** Zmiany w układzie krążenia krwi palców [52]

W wyniku drgań miejscowych w układzie nerwowym pojawiają się zaburzenia czucia dotyku i temperatury, mrowienie oraz drętwienie dłoni. Długotrwałe oddziaływanie wibracji może prowadzić do zmian w układzie kostno-stawowym, m.in. deformacji powierzchni stawowych, zwapnień torebek stawowych oraz zmian okostnej (rys. 2.4). Jeżeli narażenie na drgania utrzymuje się, zmiany te pogłębiają się, prowadząc do obniżenia efektywności pracy lub całkowitej utraty zdolności zawodowej [40], [53].

Zmiany w układzie  
kostno-stawowym



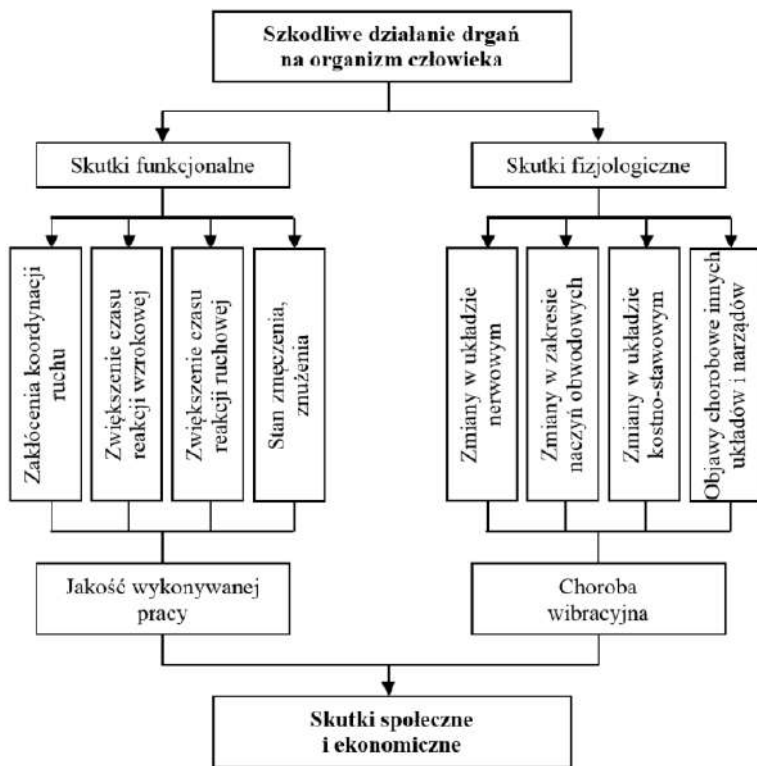
**Rys. 2.4** Zmiany w układzie kostno-stawowym [53]

Drgania o działaniu ogólnym przenoszone są na organizm motocyklisty przez siedzisko (miednica) oraz przez stopy (podnóżki). Przekroczenie wartości progowych może powodować drgania narządów wewnętrznych, zaburzenia równowagi, pogorszenie wzroku, a także uszkodzenia stawów i mięśni [54].

Oprócz skutków biologicznych, drgania wywołują również skutki funkcjonalne [43], [55], do których zalicza się m.in.:

- wydłużenie czasu reakcji ruchowej i wzrokowej,
- zakłócenia w koordynacji ruchów,
- nadmierne zmęczenie i senność,
- zaburzenie snu,
- rozdrażnienie,
- osłabienie pamięci i koncentracji.

Na rysunku 2.5 przedstawione zostały skutki funkcjonalne oraz fizjologiczne wywoływane przez szkodliwe działanie drgań na organizm człowieka.



Rys. 2.5 Wpływ drgań na organizm człowieka [43]

Niekorzystne skutki drgań prowadzą do obniżenia efektywności prowadzenia pojazdu oraz pogorszenia komfortu jazdy. W skrajnych przypadkach mogą całkowicie uniemożliwić dalszą jazdę, zmuszając kierowcę do odpoczynku. Z tego względu kontrola poziomu drgań w pojazdach motocyklowych stanowi istotny element oceny ergonomicznej i bezpieczeństwa użytkowania.



### **3. Metody pomiarów i analiz ekspozycji na drgania**

Ocena oddziaływania drgań mechanicznych na organizm człowieka stanowi istotny obszar badań w dziedzinie ergonomii, bezpieczeństwa pracy oraz inżynierii środków transportu. Analiza ekspozycji na drgania jest szczególnie ważna w przypadku użytkowników pojazdów, w tym motocykli, ze względu na bezpośredni kontakt kierowcy z elementami konstrukcyjnymi pojazdu [56].

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie podstawowych metod pomiaru i analizy drgań oddziałujących na człowieka, zgodnych z obowiązującymi normami międzynarodowymi. Omówiono procedury pomiarowe, charakterystyki ważenia częstotliwościowego oraz wskaźniki stosowane do oceny wpływu drgań na zdrowie i komfort użytkowników [27], [57], [58].

#### **3.1. Normy i podstawy oceny drgań**

Ekspozycję człowieka na drgania mechaniczne rozpatruje się w dwóch głównych obszarach:

- drgań działających na kończyny górne (drgania miejscowe),
- drgań ogólnych, przenoszonych na ciało człowieka poprzez siedzenie, stopy lub oparcie.

Pomiar i ocenę drgań mechanicznych przeprowadza się zgodnie z zaleceniami norm:

- PN-EN ISO 5349-1:2004 [48],
- PN-EN ISO 5349-2:2004 [59],
- EN 14253:2003+A1:2007 [60],

- ISO 2631-1:1997(E) [61] – w przypadku drgań oddziałujących na kończyny dolne osoby siedzącej.

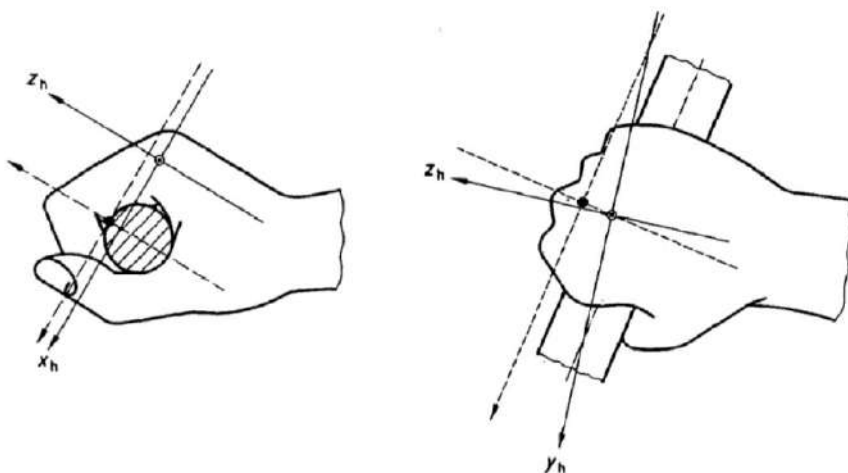
W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane informacje i zależności niezbędne do wyznaczania drgań oddziałujących na kierowców oraz pasażerów motocykli [62].

### 3.2. Pomiar drgań działających na kończyny górne

Podczas badań drgań przenoszonych na kończyny górne pomiary wykonuje się w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach:  $x_h$ ,  $y_h$ ,  $z_h$ , zgodnie z układem współrzędnych przedstawionym na rysunku 3.1.

W trakcie pomiarów rejestruje się chwilowe wartości przyspieszenia oznaczone jako:

- $ahwx(t)$  dla osi  $x$ ,
- $ahwy(t)$  dla osi  $y$ ,
- $ahwz(t)$  dla osi  $z$ .



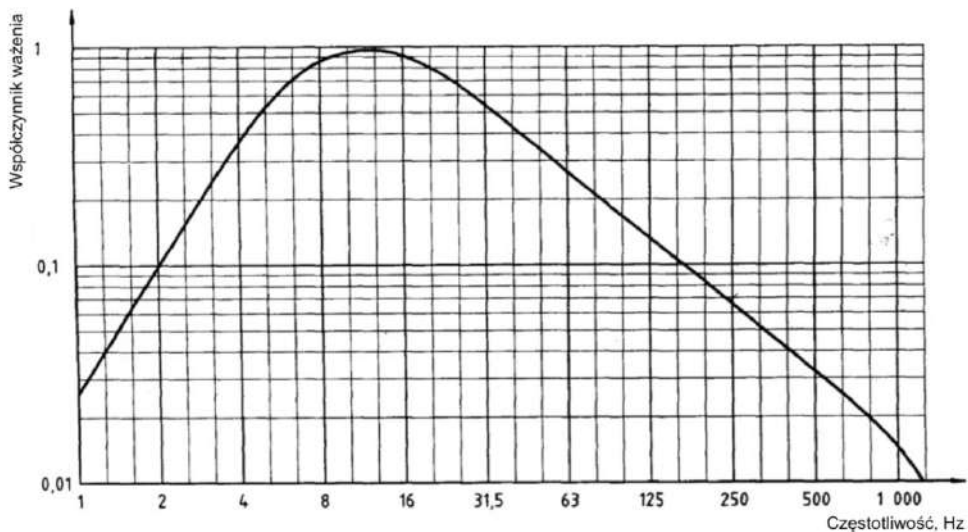
Rys. 3.1 Kierunek pomiaru drgań oddziałujących na kończyny górne [48]

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów przyspieszenia wykonuje się korekcję częstotliwościową zgodnie z charakterystyką ważenia częstotliwościowego  $W_h$ , stosowaną dla drgań przenoszonych przez kończyny górne. Charakterystyka ta obejmuje pasmo częstotliwości od 5,6 Hz do 1400 Hz i umożliwia ocenę wpływu drgań na zdrowie człowieka [48], [59], [63], [64].

Krzywą korekcyjną  $W_h$  oblicza się na podstawie funkcji ważenia częstotliwościowego  $H(s)$  (1) zgodnie z zależnością:

$$H(s) = H_b(s) \cdot H_w(s) \quad (1)$$

Krzywa ważenia częstotliwościowego  $W_h$  dla drgań przenoszonych przez kończyny górne przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2 Krzywa korekcyjna  $W_h$  [59]

Po przeprowadzeniu korekcji częstotliwościowej oblicza się wartości skuteczne przyspieszeń  $a_{hwx}$ ,  $a_{hwy}$ ,  $a_{hwz}$ , oraz sumaryczną wartość wektorową ważonych przyspieszeń drgań (2):

$$a_{hwhvi} = (a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2)^{1/2} \quad (2)$$

Całkowity czas narażenia  $t$  (3) w ciągu doby określa się jako sumę czasów trwania poszczególnych czynności:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$

W zależności od ekspozycji przyjmuje się:

- dla ekspozycji krótszej niż 30 min. (4):

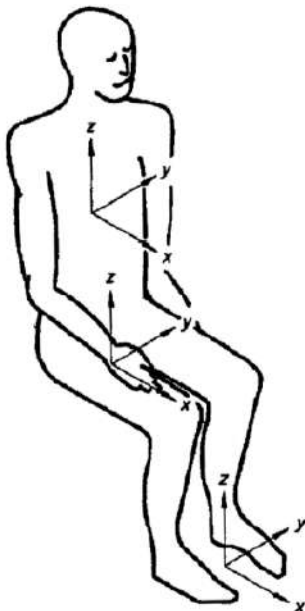
$$a_{hwhv} = \max\{a_{hwhvi}\} = \max\{a_{hwhv1} + a_{hwhv2} \dots a_{hwhvn}\} \quad (4)$$

- dla ekspozycji dłuższej niż 30 min. (5):

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{hwhvi}^2 \cdot t_i} \quad (5)$$

### 3.3. Pomiar drgań ogólnych i działających na stopy

Badania drgań ogólnych oraz drgań przenoszonych na stopy osoby siedzącej wykonuje się w trzech prostopadłych kierunkach: x, y, z, zgodnie z układem współrzędnych przedstawionym na rysunku 3.3 [61], [65].



Rys. 3.3 Kierunki pomiaru drgań ogólnych i oddziałujących na stopy [61]

W trakcie badań rejestruje się przyspieszenia:

- dla drgań ogólnych -  $a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$ ,
- dla drgań działających na stopy -  $a_{fx}$ ,  $a_{fy}$ ,  $a_{fz}$ .

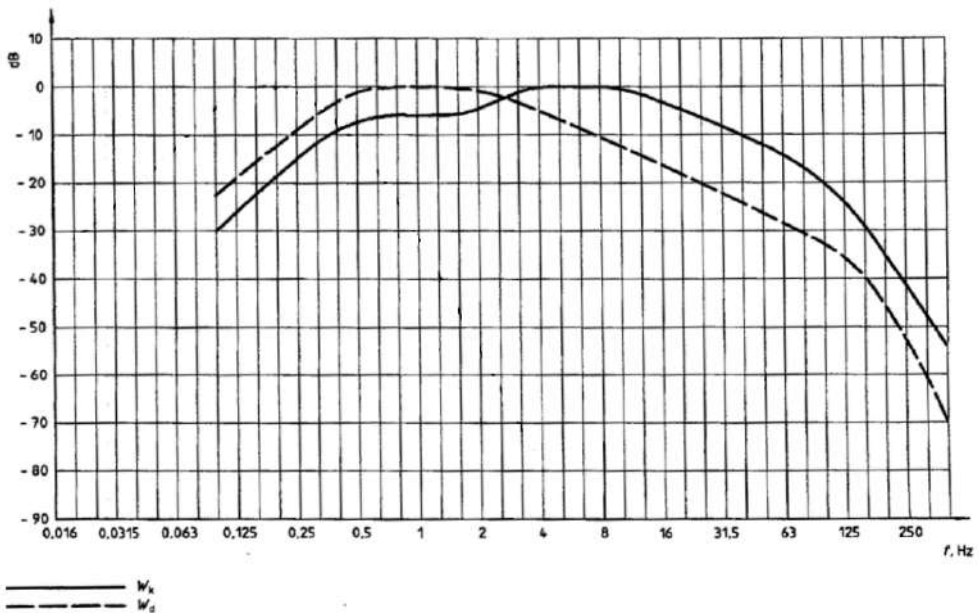
Sygnały pomiarowe poddaje się korekcji częstotliwościowej z wykorzystaniem charakterystyk ważenia  $W_d$  oraz  $W_k$  [57]. Stosuje się:

- $W_d$  dla osi x i y,
- $W_k$  dla osi z (oraz dla drgań przenoszonych przez stopy).

Całkowitą funkcję ważenia częstotliwościowego  $H(p)$  (6) określa się zależnością:

$$H(p) = H_h(p) \cdot H_l(p) \cdot H_t(p) \cdot H_s(p) \quad (6)$$

Na rysunku 3.4 zamieszczono krzywe korekcyjne  $W_d$  oraz  $W_k$ .



Rys. 3.4 Krzywe korekcyjne  $W_d$  oraz  $W_k$  [61]

Po korekcji częstotliwościowej oblicza się wartości skuteczne przyspieszeń oraz stosuje współczynniki korekcyjne  $k$ , przyjmując:

- dla osi  $x$  i  $y$  odpowiednio:  $1,4a_{wwx}$ ,  $1,4a_{wwy}$ , oraz dla osi  $z$   $1,0a_{wwz}$  w przypadku drgań ogólnych (7),
- dla osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  odpowiednio:  $0,25a_{fwx}$ ,  $0,25a_{fwy}$ ,  $0,4a_{f wz}$  w przypadku drgań przenoszonych na stopy (8).

Wartości dominujące oblicza się według zależności:

$$a_{wwmax} = \max \{1,4a_{wwx}; 1,4a_{wwy}; 1,0a_{wwz}\} \quad (7)$$

$$a_{wfmmax} = \max \{0,25a_{fwx}; 0,25a_{fwy}; 0,4a_{fwz}\} \quad (8)$$

Dla ekspozycji dłuższej niż 30 min (9, 10) wartość równoważną określa się jako:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{wwmax}^2 \cdot t_i} \quad (9)$$

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{wfmmax}^2 \cdot t_i} \quad (10)$$

### 3.4. Normy dopuszczalnych wartości drgań

W tabeli 3.1 przedstawiono dopuszczalne wartości dziennej i krótkotrwałej ekspozycji na drgania mechaniczne określone w rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia (NDN) [66].

**Tabela 3.1** Wartości dopuszczalne dla ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN) oraz wartości progów działania dla dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne [67]

Rodzaj drgań	Wartości dopuszczalne dla dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN)	Wartości dopuszczalne dla krótkotrwałych ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN)
Drgania działające przez kończyny górne (drgania miejscowe)	$A(8)_{\text{dop}}=2,8 \text{ m/s}^2$	$A_{\text{hv.30min.dop}}=11,2 \text{ m/s}^2$
Drgania o działaniu ogólnym (drgania ogólne)	$A(8)_{\text{dop}}=0,8 \text{ m/s}^2$	$A_{\text{w.30min.dop}}=3,2 \text{ m/s}^2$

Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne [66] wprowadza, za dyrektywą 2002/44/WE, dodatkowe kryterium oceny dziennej ekspozycji na drgania - próg działania. Wartości progów działania drgań mechanicznych przedstawiono w tabeli 3.2. Po przekroczeniu podanych wartości należy podjąć działania zmniejszające ryzyko powstawania drgań ponad progowych.

**Tabela 3.2.** Wartości progów działania dla dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne [40]

Rodzaj drgań	Wartość progowa działania drgań mechanicznych
Drgania działające przez kończyny górne (drgania miejscowe)	$A(8)_{\text{działanie}}=2,5 \text{ m/s}^2$
Drgania o działaniu ogólnym (drgania ogólne)	$A(8)_{\text{działanie}}=0,5 \text{ m/s}^2$

### 3.5. Wskaźniki oceny drgań

Badania nad wpływem drgań na ludzki organizm są istotne, zwłaszcza dla użytkowników pojazdów. Omówione wskaźniki obejmują parametry fizjologiczne, doznania dyskomfortu oraz aspekty biomechaniczne. Normy ISO 2631-1 i BS 6841 definiują kryteria oceny narażenia na drgania mechaniczne. Kluczowe wskaźniki, takie jak Root Mean Square (RMS), Vibration Dose Value (VDV) i Root Mean Quad (RMQ), pozwalają na kompleksową ocenę wpływu drgań na organizm ludzki, uwzględniając zarówno intensywność drgań, jak i ich czas trwania. Badania te mają na celu poprawę bezpieczeństwa i komfortu użytkowników środków transportu, a wskaźniki takie jak RMS, VDV i RMQ są istotnymi narzędziami do oceny ekspozycji na drgania.

Root Mean Square (RMS) (11) jest miarą statystyczną stosowaną do kwantyfikowania zmienności lub amplitudy sygnału zmiennego w czasie, szczególnie w przypadku drgań mechanicznych [61].

Wartość skuteczna RMS - Root Mean Square (RMS)

$$RMS = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

gdzie:

$a(t)$  jest zarejestrowanym jako funkcja czasu  $t$  przebiegiem wartości przyspieszenia w  $m/s^2$  działającego w kierunku pionowym

Vibration Dose Value (VDV) (12), to miara stosowana w analizie drgań oddziałujących na ludzi. Jest to wskaźnik określający ekspozycję człowieka na drgania, uwzględniający zarówno amplitudę, jak i czas trwania drgań. VDV jest szczególnie istotny w przypadku oceny wpływu drgań na ludzi związanych z maszynami, pojazdami czy innymi urządzeniami generującymi wibracje. Normy, takie jak ISO 2631, definiują kryteria oceny VDV, pomagając w ustalaniu bezpiecznych poziomów ekspozycji na drgania, co przyczynia się do ochrony zdrowia i komfortu pracowników narażonych na tego typu wpływy [61].

Vibration Dose Value (VDV)

$$VDV = \left[ \int_0^T a^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

gdzie:

$a(t)$  jest zarejestrowanym jako funkcja czasu  $t$  przebiegiem wartości przyspieszenia w  $m/s^2$  działającego w kierunku pionowym

Wskaźnik Root Mean Quad (RMQ) (13) powstał, aby zapewnić większy udział we wskaźniku przyspieszeń o wyższych wartościach amplitud, który został podany przez M.J. Griffina opisany w British Standards BS 684 [68].

Root Mean Quad (RMQ)

$$RMQ = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

gdzie:

a(t) jest zarejestrowanym jako funkcja czasu t przebiegiem wartości przyspieszenia w  $\text{m/s}^2$  działającego w kierunku pionowym.

Przedstawione w niniejszym rozdziale metody pomiaru i analizy ekspozycji na drgania mechaniczne umożliwiają kompleksową ocenę narażenia kierowców i pasażerów motocykli.

Omówione procedury, oparte na normach ISO i PN-EN, pozwalają na:

- rejestrację sygnałów przyspieszeń w trzech osiach,
- zastosowanie korekcji częstotliwościowej z odpowiednimi charakterystykami ważenia,
- obliczenie wartości RMS, VDV i RMQ,
- porównanie uzyskanych wyników z wartościami dopuszczalnymi i progowymi.

W dalszej części pracy przedstawiono praktyczne wykorzystanie opisanych metod w analizie drgań motocykla w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych.



## 4. Studium literatury naukowej

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącej drgań mechanicznych oddziałujących na motocyklistów oraz metod ich pomiaru, analizy i modelowania. Przegląd literatury obejmuje badania eksperymentalne, symulacyjne oraz teoretyczne, koncentrujące się na ocenie komfortu wibracyjnego i bezpieczeństwa kierowców motocykli.

W dalszej części omówiono także zagadnienia związane z oceną wpływu drgań na organizm człowieka, a także konstrukcję i rozwój stanowisk badawczych służących do ich analizy.

### 4.1. Przegląd dotychczasowych badań i metod pomiarowych stosowanych w analizie drgań motocykli oraz ekspozycji motocyklistów

Motocykliści są szczególnie narażeni na negatywne skutki działania drgań mechanicznych, które wpływają zarówno na ich komfort, jak i bezpieczeństwo jazdy. Dotychczasowe badania podkreślają konieczność szczegółowej analizy ekspozycji motocyklistów na drgania ze względu na ich istotny wpływ na zdrowie użytkowników [69].

W badaniach przeprowadzonych przez Chena i współpracowników oceniano ekspozycję motocyklistów na drgania całego ciała zgodnie z normami ISO 2631-1 i ISO 2631-5 [39]. Stwierdzono, że większość motocyklistów doświadcza poziomów drgań przekraczających dopuszczalne limity, co może prowadzić do poważnych konsekwencji zdrowotnych, takich jak bóle kręgosłupa, problemy z układem mięśniowo-szkieletowym oraz zwiększone ryzyko wypadków z powodu pogorszenia kontroli nad pojazdem [70].

Autorzy artykułu [71] skupili się na analizie drgań miejscowych przenoszonych przez kierownicę motocykla na ręce motocyklistów. Ich badania wykazały, że długotrwała ekspozycja na takie drgania może prowadzić do zaburzeń układu krążenia oraz zmian w układzie kostnowstawowym, co w konsekwencji może skutkować przewlekłymi schorzeniami.

Kowalski i Zając w swojej publikacji [72] przeprowadzili kompleksowe badania drgań oddziałujących zarówno miejscowo (kończyny górne), jak i ogólnie na motocyklistów. Wyniki ich badań potwierdziły istotność problemu narażenia motocyklistów na drgania mechaniczne oraz podkreśliły konieczność podejmowania działań mających na celu ograniczenie tej ekspozycji.

W publikacji [73] autorzy przeprowadzili badania wśród funkcjonariuszy policji poruszających się na motocyklach, oceniając subiektywne objawy w układzie ręka-ramię oraz ekspozycję na drgania związane z jazdą na motocyklu. Stwierdzili oni, że długotrwała ekspozycja na drgania może prowadzić do objawów takich jak drętwienie palców, sztywność palców oraz bóle i sztywność barków.

Dodatkowo autorzy publikacji [74] przeprowadzili badania mające na celu ocenę związku między jazdą na motocyklu, a występowaniem zaburzeń erekcji. W badaniu wzięło udział 234 motocyklistów oraz 752 zdrowych mężczyzn jako grupa kontrolna. Wyniki wykazały, że 69% motocyklistów miało zaburzenia erekcji, co sugeruje istotny związek między długotrwałą jazdą na motocyklu, a występowaniem tego zaburzenia.

Praca Griffina [38] dostarcza szczegółowych informacji dotyczących metod oceny komfortu wibracyjnego oraz analiz oddziaływania drgań na

użytkowników środków transportu. Autor podkreślił, że odpowiednia ocena drgań jest kluczowa dla poprawy komfortu i bezpieczeństwa użytkowników pojazdów.

Carratu i współpracownicy przedstawili nowoczesne metody pomiaru ekspozycji na drgania z wykorzystaniem inteligentnych urządzeń noszonych. Ich rozwiązanie pozwala kierowcom monitorować ekspozycję na drgania podczas jazdy, co może przyczynić się do lepszego zarządzania ryzykiem związanym z ekspozycją na drgania [75].

Shivakumara i Sridhar [76] przeprowadzili badania dotyczące wpływu drgań na zdrowie motocyklistów. Ich eksperymenty wykazały, że motocykliści są narażeni na ekstremalne drgania spowodowane wibracjami silnika, niewłaściwą konstrukcją motocykla oraz złym stanem dróg, co potwierdza konieczność poprawy warunków technicznych pojazdów i infrastruktury drogowej.

W artykule [77] autorzy skoncentrowali się na ilościowym określeniu drgań docierających do rąk motocyklistów motocrossowych oraz na metodach ich redukcji poprzez modyfikacje kierownicy i jej mocowań. Wyniki ich badań wskazują na skuteczność takich działań w zmniejszaniu ekspozycji na drgania, co może przyczynić się do zmniejszenia ryzyka problemów zdrowotnych.

Analiza przeprowadzona przez Moreno w pracy za pomocą sztucznych sieci neuronowych pozwoliła na oszacowanie czasu ekspozycji na drgania całego ciała u motocyklistów, uwzględniając takie czynniki jak typ drogi i masa kierowcy. Wyniki sugerują, że nowsze motocykle oraz te o większej pojemności silnika pozwalają na dłuższy czas jazdy przed osiągnięciem wartości granicznych ekspozycji na drgania.

Autorzy pracy [73] analizowali drgania przenoszone na całe ciało oraz segment ręka-ramię u motocyklistów, oceniając te parametry zgodnie z normą ISO 2631 [61] oraz Dyrektywą 2002/44/EC. Wyniki ich badań podkreślają konieczność monitorowania i ograniczania ekspozycji na drgania w celu ochrony zdrowia motocyklistów.

Ekspozycja motocyklistów na drgania stanowi istotny problem badawczy, ze względu na potencjalne negatywne skutki zdrowotne, takie jak zespół wibracyjny ręka-ramię (HAVS) czy bóle dolnego odcinka kręgosłupa [78]. W literaturze naukowej przedstawiono różnorodne metody pomiaru i analizy drgań, mające na celu ocenę narażenia kierowców motocykli oraz opracowanie strategii minimalizacji tych drgań.

Figlus, Szafraniec i Skrucany zaproponowali nowatorską metodę jednoczesnego pomiaru drgań i hałasu oddziałujących na motocyklistę w rzeczywistych warunkach drogowych [79]. Autorzy mierzyli drgania w trzech osiach na kierownicy, podnóżku oraz siedzisku, a hałas rejestrowano za pomocą mikrofonów binauralnych, umieszczonych blisko kanału słuchowego motocyklisty. Takie podejście pozwoliło na kompleksową ocenę ekspozycji oraz wskazanie obszarów o największym oddziaływaniu na kierowcę, zgodnie z normami ISO 2631-1:1997 oraz ISO 5349-1:2004.

Vijayakumar i Jagadeeswaran w swojej publikacji [80] skupili się na ocenie ekspozycji na drgania przenoszone na układ ręka-ramię u motocyklistów. W badaniach zastosowano trójosiowy wibrometr do pomiaru poziomu drgań podczas jazdy na różnych typach motocykli oraz po nawierzchniach o odmiennych właściwościach – asfaltowej, betonowej i szutrowej. Analiza wykazała istotny wpływ typu motocykla i rodzaju nawierzchni na wartości skuteczne RMS przeliczone zgodnie z normą ISO

5349-1. Autorzy wskazali na konieczność doboru konstrukcji motocykla i tras przejazdu w celu ograniczenia ekspozycji na drgania mechaniczne. Autorzy wskazali na konieczność doboru odpowiednich konstrukcji motocykli i tras przejazdu w celu minimalizacji ekspozycji na szkodliwe drgania mechaniczne.

W kolejnej publikacji autorzy prowadzili badania dotyczące zawodników motocrossowych, które dowiodły, że poziom drgań przenoszonych na ręce kierowców osiąga wartości graniczne już w czasie krótszym niż godzina jazdy. Autorzy wykazali również, że popularnie stosowane elementy gumowe motocykla mają ograniczoną skuteczność w tłumieniu częstotliwości szkodliwych dla układu mięśniowo-szkieletowego, analizując wyniki w świetle normy ISO 5349.

W pracy [81] przeprowadzono badania eksperymentalne z zastosowaniem planu czynnikowego  $2^4$ . Celem analizy było określenie wpływu czterech zmiennych niezależnych – wieku motocykla, pojemności skokowej silnika, rodzaju nawierzchni drogowej oraz masy ciała kierowcy – na czas ekspozycji prowadzący do osiągnięcia dziennego poziomu działania EAV, określonego zgodnie z normą ISO 2631-1:1997.

Pomiar drgań przeprowadzono z użyciem trój-osiowego czujnika przyspieszeń zainstalowanego na powierzchni siedziska motocykla, co pozwoliło na rejestrację przyspieszeń drgań w osiach X, Y i Z w czasie rzeczywistym. Na podstawie uzyskanych danych obliczono ekwiwalentne przyspieszenia ważone oraz czas do osiągnięcia EAV.

Wyniki wykazały istotny statystycznie wpływ analizowanych czynników na poziom narażenia kierowcy na WBV. Stwierdzono, że motocykle nowszej generacji pozwalają na wydłużenie czasu ekspozycji przed osiągnięciem wartości granicznej EAV o ok. 36% w porównaniu

z motocyklami starszymi. Analogicznie, pojazdy o większej pojemności skokowej silnika (125 cm<sup>3</sup>) wykazywały wzrost tolerancji ekspozycyjnej o ok. 22 % w porównaniu z mniejszymi jednostkami. Największy wpływ miała jednak nawierzchnia – jazda po drogach o wyższych parametrach równości pozwalała na wydłużenie bezpiecznego czasu ekspozycji na WBV aż o 44 %.

Autorzy podkreślili znaczenie uwzględnienia charakterystyk dynamicznych pojazdu oraz warunków eksploatacji w ocenie ryzyka zawodowego związanego z drganiami mechanicznymi. Uzyskane wyniki mają zastosowanie w kontekście zgodności z wymaganiami Dyrektywy 2002/44/WE oraz mogą stanowić podstawę do opracowania strategii ergonomicznej optymalizacji konstrukcji motocykli.

Przeprowadzony przegląd literatury potwierdza, że ekspozycja motocyklistów na drgania mechaniczne stanowi istotne zagrożenie zarówno dla komfortu jazdy, jak i zdrowia użytkowników pojazdów jednośladowych. W badaniach wykazano, że drgania oddziałujące na ciało kierującego, zarówno w ujęciu ogólnym (whole-body vibration – WBV), jak i miejscowym (hand-arm vibration – HAV), mogą przekraczać dopuszczalne limity określone w normach ISO 2631-1, ISO 2631-5 oraz ISO 5349-1. Skutkami długotrwałej ekspozycji są m.in. bóle kręgosłupa, zaburzenia w układzie kostno-stawowym, neurologiczne objawy w kończynach górnych, a nawet dysfunkcje układu krążenia i rozrodczego.

Zgromadzone dane empiryczne obejmują zarówno analizy subiektywnych objawów wśród motocyklistów (w tym służb mundurowych), jak i wyniki pomiarów przyspieszeń drgań na różnych powierzchniach kontaktowych motocykla. Badania prowadzone były w warunkach rzeczywistej eksploatacji lub w kontrolowanych środowiskach

laboratoryjnych. Szczególnie istotne znaczenie miały badania określające wpływ typu nawierzchni, konstrukcji pojazdu oraz masy kierowcy na czas osiągnięcia poziomu dziennej ekspozycji EAV. Oceniano także skuteczność różnych rozwiązań technicznych mających na celu ograniczenie transmisji drgań – w tym modyfikacji konstrukcji kierownicy oraz zastosowania elementów elastycznych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wyróżnić trzy główne grupy metod stosowanych w badaniach ekspozycji motocyklistów na drgania: (1) metody bezpośrednie z użyciem trój-osiowych czujników przyspieszeń, (2) metody pośrednie i modelowe oparte na analizach statystycznych oraz modelowaniu (w tym z użyciem sztucznych sieci neuronowych), oraz (3) metody innowacyjne z wykorzystaniem urządzeń ubieralnych i systemów mobilnych. Szczególne znaczenie mają również kompleksowe podejścia, łączące równoległe pomiary drgań i hałasu (np. z użyciem mikrofonów binauralnych), które pozwalają na pełniejszą ocenę obciążenia sensorycznego motocyklisty.

Zróznicowanie metod pomiarowych oraz zakresu analiz świadczy o rosnącej świadomości ryzyka związanego z długotrwałą ekspozycją na drgania mechaniczne. Wnioski płynące z przeglądu literatury jasno wskazują na konieczność wdrażania zintegrowanych strategii pomiarowych, uwzględniających indywidualne cechy kierowcy, parametry pojazdu oraz warunki drogowe. Wyniki tych badań stanowią podstawę dla dalszych działań ukierunkowanych na ergonomiczne doskonalenie konstrukcji motocykli oraz rozwój norm i regulacji prawnych mających na celu ochronę zdrowia użytkowników.

## **4.2. Przegląd modeli symulacyjnych i analiz numerycznych dotychczasowych wykorzystywanych w ocenie komfortu wibracyjnego w motocyklu**

Współczesna inżynieria kładzie coraz większy nacisk na aspekty związane z komfortem jazdy, nie tylko w kontekście ergonomii, ale również w odniesieniu do komfortu dynamicznego, w tym wibracyjnego. Wibracje przenoszone na kierowcę i pasażera przez układ napędowy, zawieszenie oraz nierówności nawierzchni mają istotny wpływ na zmęczenie, odczucia subiektywne oraz bezpieczeństwo. Jednym z głównych narzędzi służących do analizy tych zjawisk są modele symulacyjne, które pozwalają na przewidywanie zachowań motocykla i jego interakcji z użytkownikiem w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych [82], [83], [84], [85].

Poniższy przegląd prezentuje wybrane, reprezentatywne prace naukowe dotyczące symulacyjnego modelowania wibracji motocykli, ze szczególnym uwzględnieniem ich przydatności w optymalizacji komfortu jazdy.

W pracy [86] przeprowadzono kompleksową analizę modalną motocykla klasy 125CC w celu identyfikacji jego charakterystyki dynamicznej. Zbudowano uproszczony model numeryczny, który posłużył do wyznaczenia częstotliwości własnych oraz postaci drgań nadwozia. Na podstawie wyników zaproponowano modyfikacje strukturalne – wzmocnienie ramy oraz zastosowanie alternatywnych materiałów w obszarach o największym wpływie na przenoszenie wibracji. Autorzy wykazali, że zmiany te prowadzą do znaczącej redukcji amplitudy drgań w zakresie częstotliwości krytycznych dla ludzkiego komfortu (4–8 Hz), co pozytywnie wpływa na subiektywną ocenę jakości jazdy.

Interesującym podejściem wykazała się praca autorów [87], w której zastosowano model wieloczołowy z wirtualnym manekinem do oceny wibracji przenoszonych na ciało kierowcy. Model uwzględniał rzeczywiste właściwości materiałowe siedziska, ramy, zawieszenia oraz biomechanikę ciała ludzkiego. Symulacje przeprowadzono dla różnych warunków drogowych i obciążeń, a wyniki porównano z normami ISO dotyczącymi dopuszczalnych wartości przyspieszeń całkowitych. Metodologia ta pozwala na precyzyjne odwzorowanie reakcji kierowcy na drgania i umożliwia predykcję skutków długotrwałej ekspozycji na wibracje.

W artykule [88] wykorzystano oprogramowanie MSC ADAMS do budowy zaawansowanego modelu sztywno-elastycznego motocykla. Model uwzględniał deformacje elementów ramy oraz układów zawieszenia, a także wymuszenia w postaci nierówności nawierzchni i drgań generowanych przez silnik. Dzięki możliwości parametryzacji modelu, autorzy przeprowadzili analizę wrażliwości, identyfikując najistotniejsze czynniki wpływające na komfort kierowcy. Wyniki wskazały, że zastosowanie materiałów kompozytowych w określonych punktach konstrukcji może zmniejszyć poziom drgań o ponad 20%.

Zrealizowane dotychczas badania jednoznacznie wskazują na złożoność zagadnienia komfortu wibracyjnego motocykli oraz wieloaspektowość podejść stosowanych w jego analizie. Modele symulacyjne – zarówno uproszczone, jak i zaawansowane (wieloczołowe lub sztywno-elastyczne) – stanowią nieocenione narzędzie do oceny i poprawy komfortu jazdy.

Pomimo istotnych postępów w dziedzinie modelowania, zauważalny jest brak kompleksowego modelu motocykla, który uwzględniałby

jednocześnie zmienne warunki drogowe i parametry eksploatacyjne w sposób zintegrowany. Istnieje zatem wyraźna potrzeba opracowania kompletnego modelu numerycznego motocykla do analizy komfortu wibracyjnego – co stanowi jeden z głównych celów niniejszej rozprawy doktorskiej.

W świetle dotychczasowych ustaleń istotne staje się również poszukiwanie nowych, bardziej zaawansowanych metod pomiaru i analizy drgań, które umożliwią precyzyjne odwzorowanie warunków rzeczywistych na stanowiskach badawczych. Integracja pomiarów terenowych z symulacjami laboratoryjnymi pozwoli nie tylko na wierne odtworzenie przebiegów drgań w warunkach kontrolowanych, ale także na walidację modeli numerycznych i optymalizację konstrukcji pojazdów w fazie projektowej. Takie podejście otwiera nowe możliwości w zakresie prewencji zagrożeń wibracyjnych, testowania innowacyjnych rozwiązań inżynierskich oraz tworzenia standardów dopasowanych do specyfiki eksploatacji motocykli w zróżnicowanym środowisku transportowym.

### **4.3. Przegląd stanowisk badawczych do testów wibracyjnych motocykli**

Symulacyjne badania dynamiczne motocykli odgrywają kluczową rolę w zrozumieniu i ocenie wpływu drgań na komfort oraz bezpieczeństwo kierowcy. W kontekście analizy drgań motocykla, odpowiednio zaprojektowane stanowiska badawcze są niezbędne do przeprowadzania precyzyjnych i wiarygodnych testów, które mogą dostarczyć cennych danych na temat zachowania pojazdu w różnych warunkach eksploatacyjnych.

W niniejszym podrozdziale zaprezentowano stanowiska przeznaczone do symulacyjnych badań drogowych, opracowane z myślą

o analizie drgań w motocyklach i mające na celu zwiększenie komfortu oraz bezpieczeństwa kierowcy i pasażera.

Na Uniwersytecie w Brescii opracowano zostało stanowisko służące do oceny pionowych właściwości dynamicznych motocykli, zapewniając wyjątkową zdolność do odtwarzania rzeczywistych sytuacji podczas jazdy. Stanowisko badawcze opracowane przez Inova GmbH umożliwia badanie motocykli poprzez zastosowanie systemu o 4 stopniach swobody, umożliwiając w ten sposób szczegółową analizę różnorodnych komponentów motocykla. Każde z opisanych poniżej stanowisk spełnia unikalną i wzajemnie powiązaną funkcję w rozwoju i poprawie inżynierii motocykli oraz bezpieczeństwa motocyklistów.

Poprzez analizę i porównanie różnych stanowisk badawczych, rozdział ten ma na celu ukazanie obecnych możliwości oraz kierunków rozwoju w dziedzinie symulacyjnych badań dynamicznych motocykli, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na komfort i bezpieczeństwo jazdy.

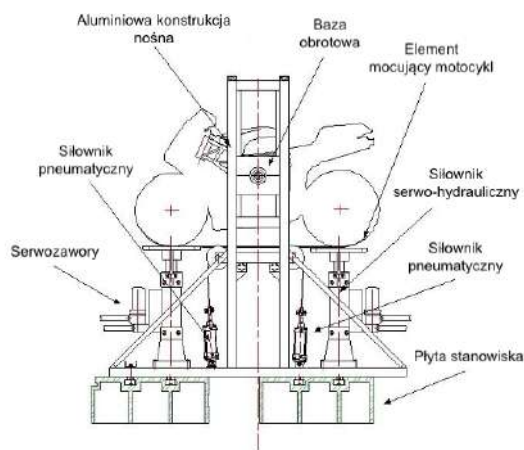
### **Symulator BikeShake**

W artykule [74] przedstawiono innowacyjną konfigurację zaprojektowaną do oceny motocykli przy użyciu czterosłupowego systemu testowego Servo. System ten został opracowany jako narzędzie inżynieryjne mające na celu ocenę dynamicznego zachowania motocykli w pionie oraz ich interakcji z drogą. Aby zachować właściwości bezwładności motocykla, należało opracować specjalistyczny system zabezpieczający.

Proponowany system badawczy opiera się na wykorzystaniu rzeczywistego motocykla, co pozwala uwzględnić zarówno subiektywne informacje zwrotne kierowcy, jak i obiektywne dane uzyskane z analizy

różnych czynników, takich jak częstotliwości własne, przyspieszenie i przemieszczenie piasty koła, ruch podwozia, charakterystyka zawieszenia, badania zmęczeniowe oraz ogólny hałas, analiza wibracji i twardości.

Obecnie na świecie istnieje ograniczona liczba ośrodków badawczo-rozwojowych, które posiadają zdolność niezależnego wykonania zadań na pojedynczym motocyklu. W trakcie poszukiwań nie znaleziono takich stanowisk testowych w południowej Europie. W związku z tym, Uniwersytet w Brescii, a konkretnie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Przemysłowej, podjął decyzję o ulepszeniu czteropodopowego stanowiska testowego przez włączenie specjalnie zaprojektowanego oprzyrządowania. Ta modyfikacja umożliwia stanowisku przeprowadzanie testów na pojazdach dwukołowych, oprócz jego istniejących możliwości. W tym scenariuszu motocykl jest pozycjonowany w taki sposób, że wspierany jest przez dwa z czterech siłowników, razem z aluminiową strukturą przedstawioną na rysunku 4.1. Układ ten został starannie zaprojektowany w taki sposób aby dynamiczna reakcja motocykla pozostawała niezmienną [74].



Rys. 4.1 Schemat symulatora BikeShake [74]

Motocykl zamontowany jest w systemie umożliwiającym swobodny ruch wokół środka ciężkości – zarówno w kierunku pionowym, jak i podłużnym. W celu odwzorowania odkształceń zawieszenia i symulacji sił podłużnych wynikających z przyspieszania oraz hamowania zastosowano dwa siłowniki pneumatyczne.[74].

Symulator BikeShake został zaprojektowany w celu realistycznego odwzorowania warunków jazdy motocyklem, umożliwiając analizę różnych aspektów dynamiki pojazdu oraz komfortu jazdy. Symulator jest zamontowany na specjalnie zaprojektowanej platformie, która umożliwia symulację ruchów motocykla w różnych kierunkach. Konstrukcja ta jest stabilna i umożliwia montaż motocykla w sposób, który realistycznie odwzorowuje jego zachowanie podczas jazdy. Kluczową cechą symulatora jest zastosowanie nowoczesnych technologii wirtualnej rzeczywistości, które tworzą realistyczne środowisko jazdy. Dodatkowo, symulator wykorzystuje zaawansowane sensory do dokładnego monitorowania ruchów motocykla oraz reakcji kierowcy [74].

Jednym z głównych atutów symulatora BikeShake jest jego interaktywność. Projekt ten umożliwia kierowcy interakcję z symulowanym środowiskiem w czasie rzeczywistym, co pozwala na zmianę warunków drogowych oraz scenariuszy jazdy. Dzięki temu możliwe jest przeprowadzanie różnorodnych testów, które mogą obejmować symulacje różnych typów nawierzchni, warunków pogodowych oraz innych czynników wpływających na jazdę motocyklem [74].

Symulator BikeShake jest wyposażony w zaawansowane narzędzia analityczne, które pozwalają na szczegółową analizę zebranych danych dotyczących drgań, dynamiki jazdy oraz komfortu kierowcy. Dane te są

zbierane i analizowane w czasie rzeczywistym, co umożliwia natychmiastowe dostosowanie warunków testowych. Dzięki temu symulator stanowi cenne narzędzie do badania wpływu różnych czynników na komfort i bezpieczeństwo kierowcy, a także do testowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych w kontrolowanych warunkach [74].



**Rys. 4.2** Motocykl podczas badania na symulatorze BikeShake [74]

Symulator BikeShake jest przykładem nowoczesnego podejścia do badań symulacyjnych. Łączy zaawansowane technologie z interaktywnością i wszechstronną analizą danych, co czyni go cennym narzędziem zarówno dla inżynierów, jak i naukowców, dążących do poprawy komfortu oraz bezpieczeństwa jazdy motocyklem.

### **Stanowisko testowe firmy Inova GmbH**

Stanowisko testowe przedstawione w niniejszym podrozdziale zostało zaprojektowane przez firmę Inova GmbH. Inova jest uznawana za wiodącą globalną firmę specjalizującą się w opracowywaniu i produkcji

zaawansowanych serwohydraulicznych i mechanicznych systemów testujących. Systemy te są najczęściej wykorzystywane do celów symulowania obciążeń eksploatacyjnych. Stanowisko przedstawione na rys. 4.3. wykorzystuje nowoczesne technologie i zaawansowane metody pomiarowe, aby umożliwić dokładną analizę dynamicznego zachowania motocykli w różnych warunkach testowych [89].



Rys. 4.3 Stanowisko testowe firmy Inova GmbH [89]

Stanowisko testowe firmy INOVA opiera się na czterosłupowym systemie Servo, który umożliwia precyzyjną kontrolę i symulację ruchów motocykla w różnych osiach. System ten zapewnia stabilność i dokładność pomiarów, co jest kluczowe dla wiarygodnych wyników testów. W celu zachowania właściwości bezwładności motocykla, stanowisko zostało wyposażone w specjalistyczny system zabezpieczający. System ten pozwala na swobodny ruch motocykla wokół jego środka ciężkości, co obejmuje zarówno przechylenie, jak i ruch pionowy. Dzięki temu możliwa jest analiza

interakcji między dynamicznymi charakterystykami podłużnymi i pionowymi motocykla [89].

Stanowisko Inova GmbH umożliwia prowadzenie badań z użyciem rzeczywistych motocykli, co pozwala na połączenie obiektywnych danych pomiarowych z subiektywnymi odczuciami kierowcy. System pozwala na analizę częstotliwości własnych, przyspieszeń, przemieszczeń, ruchu podwozia, charakterystyki zawieszenia, hałasu, drgań oraz twardości elementów konstrukcyjnych [89].

Aby symulować odkształcenia zawieszenia i siły podłużne wynikające z przyspieszania i hamowania, stanowisko zostało wyposażone w dwa siłowniki pneumatyczne. Siłowniki te zostały specjalnie zaimplementowane, aby naśladować rzeczywiste warunki jazdy motocyklem. Dzięki integracji tych elementów, stanowisko testowe firmy INOVA jest w stanie dokładnie odwzorować rzeczywiste warunki eksploatacyjne motocykli, co pozwala na precyzyjną analizę ich dynamicznego zachowania [89].

Stanowisko testowe firmy INOVA GmbH jest przykładem zaawansowanego narzędzia badawczego, które łączy nowoczesne technologie z dokładnymi metodami pomiarowymi. Dzięki możliwościom precyzyjnej kontroli i analizy dynamicznych zachowań motocykli, stanowisko to stanowi cenne narzędzie dla inżynierów i naukowców dążących do poprawy komfortu i bezpieczeństwa jazdy.

Badania symulacyjne motocykli, realizowane z wykorzystaniem stanowisk BikeShake (Uniwersytet w Brescii) oraz systemu opracowanego przez firmę Inova GmbH, odgrywają istotną rolę w analizie wpływu drgań na komfort i bezpieczeństwo użytkowników jednośladów. Oba stanowiska umożliwiają wierne odwzorowanie dynamicznego zachowania motocykla

w warunkach odpowiadających rzeczywistej eksploatacji. Symulator BikeShake cechuje się wysokim poziomem interaktywności oraz zastosowaniem technologii rzeczywistości wirtualnej, natomiast stanowisko Inova GmbH wyróżnia się precyzyjnymi metodami pomiarowymi i możliwością kompleksowej oceny komponentów pojazdu. Obydwa rozwiązania umożliwiają analizę oddziaływań związanych z przyspieszaniem, hamowaniem i pracą zawieszenia przy użyciu siłowników pneumatycznych.

Stanowiska te stanowią przykład nowoczesnego podejścia do badań inżynierskich, integrującego zarówno subiektywne informacje zwrotne od kierowcy, jak i obiektywne dane pomiarowe. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie szczegółowej wiedzy na temat charakterystyk dynamicznych motocykli oraz wpływu warunków eksploatacyjnych na komfort jazdy i bezpieczeństwo. Rozwój tego typu systemów badawczych wyznacza kierunek postępu w dziedzinie konstrukcji i weryfikacji jednośladów, stanowiąc istotne wsparcie dla projektowania nowoczesnych rozwiązań technicznych w transporcie indywidualnym.

W świetle rosnących potrzeb badawczych oraz ograniczonej dostępności stanowisk przeznaczonych do symulacyjnych testów motocykli, istnieje wyraźna konieczność budowy kolejnych, zaawansowanych stanowisk badawczych dedykowanych tej grupie pojazdów [90]. Nowe stanowisko powinno umożliwiać odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych w środowisku laboratoryjnym, z uwzględnieniem dynamicznych obciążeń oraz interakcji zawieszenia i masy motocyklisty z nawierzchnią. Uzupełnieniem stanowiska powinny być zaawansowane systemy pomiarowe. Budowa takiego stanowiska umożliwi nie tylko bardziej kompleksowe testowanie motocykli, ale także walidację nowych rozwiązań

konstrukcyjnych i technologicznych w powtarzalnych, kontrolowanych warunkach, z zachowaniem zgodności z obowiązującymi normami dotyczącymi analizy drgań i komfortu jazdy.

## **5. Cel i zakres pracy**

Przedstawiony w niniejszej rozprawie doktorskiej przegląd literatury jednoznacznie wskazuje, że ekspozycja użytkowników motocykli na oddziaływania wibracyjne stanowi istotny problem wpływający zarówno na komfort jazdy, jak i na zdrowie motocyklistów. Rozpoznawanie oraz ocena tego typu oddziaływań pozostają aktualnym i ważnym zagadnieniem badawczym, szczególnie w kontekście rosnącej popularności motocykli jako środka codziennego transportu.

Dynamiczny rozwój układów pomiarowych, czujników przyspieszeń oraz systemów cyfrowego przetwarzania sygnałów umożliwia obecnie prowadzenie badań znacznie bardziej szczegółowych niż dotychczas. Dotyczy to zarówno badań realizowanych w warunkach rzeczywistych, jak i badań stanowiskowych, w których możliwe jest precyzyjne odwzorowanie wymuszeń dynamicznych oraz kontrola warunków eksperymentu. Postęp ten stwarza nowe możliwości w zakresie analizy drgań oddziałujących na motocyklistę oraz projektowania rozwiązań technicznych ograniczających ich negatywne skutki.

W niniejszej pracy podjęto problem badawczy dotyczący oceny drgań oddziałujących na kierujących motocyklami, co stanowiło podstawę do sformułowania celów badawczych oraz też rozprawy.

### **5.1. Cel teoretyczny**

Celem teoretycznym niniejszej pracy jest opracowanie zweryfikowanego modelu matematycznego motocykla, wykorzystywanego zarówno w badaniach drogowych, jak i stanowiskowych, umożliwiającego analizę drgań oddziałujących na motocyklistę w warunkach dynamicznych.

## **5.2. Cel praktyczny**

Celem praktycznym pracy jest opracowanie i weryfikacja innowacyjnych rozwiązań technicznych ukierunkowanych na redukcję drgań oddziałujących na motocyklistę, prowadzących do poprawy komfortu jazdy oraz bezpieczeństwa użytkownika motocykla.

## **5.3. Uzasadnienie**

Współczesne motocykle stanowią nie tylko popularny środek transportu, lecz również istotny element mobilności indywidualnej w warunkach rosnącego zatłoczenia miast oraz zmieniających się potrzeb komunikacyjnych społeczeństwa. Jednocześnie eksploatacja jednośladów wiąże się z licznymi wyzwaniami technicznymi i ergonomiczno-zdrowotnymi, spośród których szczególne znaczenie ma oddziaływanie drgań mechanicznych na ciało motocyklisty.

Nadmierna ekspozycja na drgania może prowadzić do obniżenia komfortu jazdy, zmniejszenia zdolności koncentracji, przyspieszonego zmęczenia, a w dłuższej perspektywie do wystąpienia przewlekłych dolegliwości układu mięśniowo-szkieletowego. Do najczęściej wskazywanych skutków zdrowotnych należą m.in. zespół wibracyjny ręką–ramię oraz dolegliwości bólowe dolnego odcinka kręgosłupa.

Zidentyfikowane w literaturze braki dotyczą przede wszystkim niedostatecznej liczby badań integrujących pomiary terenowe, badania stanowiskowe oraz analizy numeryczne, a także ograniczonego wykorzystania nowoczesnych stanowisk laboratoryjnych zdolnych do wiernego odwzorowania rzeczywistych warunków drogowych. Z tego względu uzasadnione stało się zaprojektowanie i rozbudowa dedykowanego stanowiska

badawczego umożliwiającego prowadzenie kontrolowanych eksperymentów symulacyjnych oraz walidację modeli dynamicznych motocykla.

#### **5.4. Zakres pracy**

Zakres niniejszej rozprawy doktorskiej obejmuje:

- studium literaturowe zagadnień związanych z komfortem i bezpieczeństwem jazdy w układzie droga-motocykl-kierowca,
- opracowanie metody pomiarów i analiz ekspozycji motocyklisty na drgania,
- opracowanie konstrukcji i budowy stanowiska laboratoryjnego do symulacyjnych badań pojazdów jednośladowych,
- przeprowadzanie badań w warunkach rzeczywistych,
- realizacja badań w warunkach stanowiskowych,
- opracowanie modelu matematycznego na podstawie wyników badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych oraz symulowanych warunkach drogowych (na stanowisku badawczym),
- opracowanie koncepcji oraz wykonanie tłumika drgań redukującego drgania motocykla,
- badania weryfikujące własność tłumika drgań.

#### **5.5. Metodologia badawcza**

W niniejszej pracy zastosowano kompleksową i wieloetapową metodologię badawczą, obejmującą zarówno badania eksperymentalne, jak i zaawansowane analizy symulacyjne. Jej celem była rzetelna ocena drgań przenoszonych na motocyklistę oraz identyfikacja skutecznych rozwiązań

technicznych poprawiających komfort i bezpieczeństwo użytkowników motocykli.

Podstawowym elementem metodyki badawczej była konstrukcja dedykowanego stanowiska laboratoryjnego, opartego na zaawansowanych technologicznie podzespołach firmy MTS, przeznaczonych do badań dynamicznych i wibracyjnych. Stanowisko to umożliwiało wierne odwzorowanie wymuszeń drogowych w warunkach kontrolowanych, co pozwalało na prowadzenie powtarzalnych i precyzyjnych pomiarów.

Drgania generowane na stanowisku były odwzorowywane z wykorzystaniem oprogramowania Moog Replication, umożliwiającego symulację rzeczywistych profili nierówności nawierzchni drogowych. Takie podejście pozwoliło na szczegółową analizę odpowiedzi dynamicznej motocykla w warunkach laboratoryjnych, odpowiadających warunkom eksploatacyjnym.

Równolegle prowadzono badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych, w których rejestrowano drgania oddziałujące na motocyklistę. Zebrane dane były następnie analizowane z wykorzystaniem środowiska MATLAB (wersja R2024a), umożliwiającego obróbkę sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości, w tym wyznaczanie wartości RMS, VDV, RMQ oraz analiz widmowych.

Istotnym elementem metodologii było również opracowanie modelu matematycznego motocykla w środowisku CAD (SolidWorks) oraz przeprowadzenie symulacji dynamicznych w programie LS-DYNA. Integracja wyników badań rzeczywistych i symulacyjnych umożliwiła walidację modelu numerycznego oraz ocenę skuteczności zaproponowanych rozwiązań technicznych.

Zastosowana metodologia, łącząca pomiary terenowe, badania stanowiskowe i symulacje komputerowe, pozwoliła na uzyskanie wyników o wysokiej wartości naukowej i aplikacyjnej oraz przyczyniła się do rozwoju wiedzy w zakresie dynamiki motocykli oraz komfortu i bezpieczeństwa ich użytkowników.



## **6. Badania eksperymentalne - pomiar drgań oddziałujących na motocyklistę w warunkach rzeczywistych**

Badania przedstawione w niniejszym rozdziale stanowią unikalne podejście do analizy drgań oddziałujących na motocyklistę podczas jazdy w rzeczywistych warunkach drogowych. Ich unikalność wynika zarówno z szerokiego zakresu nawierzchni, na których prowadzono pomiary, jak i z nietypowego rozmieszczenia czujników pomiarowych – zainstalowanych na kierownicy, siedzisku oraz przy osi przedniej i tylnej motocykla. Tak kompleksowe podejście do rejestracji drgań nie zostało dotychczas opisane w literaturze naukowej.

Uzyskane w trakcie badań sygnały zostaną wykorzystane do odwzorowania rzeczywistych warunków na stanowiskach badawczych, co pozwoli na dalszą, precyzyjną analizę wpływu drgań na organizm człowieka. W rozdziale szczegółowo omówiono zastosowaną aparaturę, procedury pomiarowe oraz przeprowadzoną analizę danych, koncentrując się na poziomie i charakterystyce drgań istotnych z punktu widzenia komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

Celem badań było określenie poziomu przyspieszeń wibracyjnych przenoszonych na kierowcę motocykla, ich rozkładu częstotliwościowego oraz czasu ekspozycji na drgania, zgodnie z normami ISO 2631-1:1997 i ISO 5349-1:2004. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do opracowania modelu numerycznego oraz odwzorowania rzeczywistych warunków drganiowych w środowisku laboratoryjnym.

## 6.1. Obiekt badań

Do badań wykorzystano motocykl Yamaha XV 125, który został dopuszczony do ruchu zgodnie z ustawą Prawo o ruchu drogowym, (Art. 71-80). Motocykl znajdował się w bardzo dobrym stanie technicznym. Został on wyposażony w czterosuwowy silnik o pojemności skokowej 124 cm<sup>3</sup>, mocy maksymalnej 8,3 kW i momencie obrotowym 9,2 Nm. Masa własna pojazdu wynosiła 139 kg. Motocykl charakteryzuje się klasyczną konstrukcją z przednim zawieszeniem teleskopowym i tylnym zawieszeniem wahaczowym z amortyzatorami sprężynowo-olejowymi.

W badaniach przyjęto standardowe ustawienia zawieszenia zgodne z zaleceniami producenta dla jazdy jednoosobowej. Ciśnienie w oponach wynosiło odpowiednio 200 kPa (przód) i 225 kPa (tył). Przed rozpoczęciem pomiarów dokonano przeglądu technicznego pojazdu, obejmującego kontrolę luzów łożysk, napięcia łańcucha napędowego oraz sprawności amortyzatorów. W celu lepszego zrozumienia konfiguracji pojazdu, został on przedstawiony na rysunku 6.1.



Rys. 6.1 Widok pojazdu wykorzystanego w badaniach

## 6.2. Aparatura pomiarowa

Do badań wykorzystano układ pomiarowy składający się z czterech trójkierunkowych czujników przyspieszeń PCB Electronics 356B41, których sposób zamocowania w poszczególnych miejscach został przedstawiony na rysunku 6.2. Czujniki przy osi koła mocowane są za pomocą uchwytu pomiarowego, do którego zostały przykręcone za pomocą czterech śrub. Na kierownicy czujnik przyspieszeń montowany był za pomocą taśmy, natomiast na siedzisku przyspieszenia rejestrowane były przy użyciu specjalnego dysku, w którym umieszczony był czujnik przyspieszeń.



a)



b)



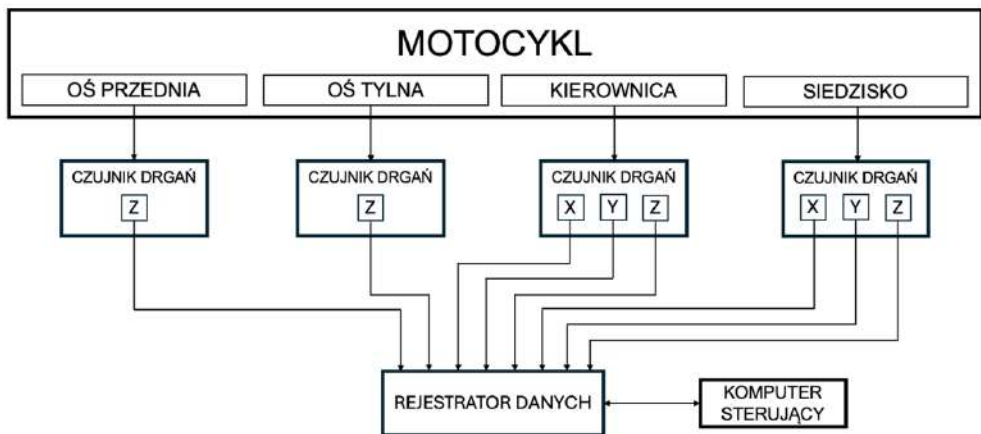
c)



d)

**Rys. 6.2** Rozmieszczenie czujników przyspieszeń  
a – oś przednia, b – oś tylna, c – kierownica, d – siedzisko

Do archiwizacji danych z czujników przyspieszeń posłużył laptop z oprogramowaniem LMS Test Express. Mierzono przyspieszenia w kierunku pionowym na osiach przedniej i tylnej, przyspieszenia trójosiowe na kierownicy i siedzisku. Częstotliwość próbkowania wynosiła 200 Hz. Zarejestrowane przebiegi posłużyły do wyznaczenia czasowych przebiegów losowych od wymuszeń nierówności drogi oraz wskaźników globalnych. Na rysunku 6.3 przedstawiono schemat układu pomiarowego.



Rys. 6.3 Schemat układu pomiarowego

### 6.3. Warunki badań i przebieg pomiarów

Badania przeprowadzono na wybranych odcinkach dróg o zróżnicowanym stanie nawierzchni. Zrealizowano je na sześciu różnych typach odcinków, przedstawionych na rysunku 6.4. Obejmowały one:

- odcinek drogi asfaltowej o dobrym stanie technicznym nawierzchni, na którym wykonywano badania przy prędkości 50 km/h,
- odcinek drogi asfaltowej o złym stanie technicznym, na którym wykonywano badania przy prędkości 50 km/h,

- odcinek drogi o nawierzchni z kostki brukowej, na którym wykonywano badania przy prędkości 50 km/h,
- odcinek drogi o nawierzchni z prefabrykowanych płyt betonowych, na którym wykonywano badania przy prędkości 20 km/h,
- odcinek drogi wyposażony w próg podrzutowy, na którym wykonywano badania przy prędkości 10 km/h,
- odcinek drogi wyposażony w listwowy próg zwalniający, na którym wykonywano badania przy prędkości 20 km/h.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

**Rys. 6.4** Zbiorcze zestawienie odcinków drogowych na których realizowane były badania: a – droga w dobrym stanie technicznym, b – droga w złym stanie technicznym, c – droga z kostki brukowej, d – droga z prefabrykowanych płyt betonowych, e – droga z progiem podrzutowym do 10 km/h, f – droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h.

Podczas pomiarów kierowca utrzymywał stałą pozycję ciała, ograniczając ruchy rąk i tułowia, co zapewniło powtarzalność wyników. Każdy przejazd trwał od 30 do 60 sekund.

Warunki atmosferyczne podczas badań były stabilne – temperatura powietrza wynosiła około 17°C. Przed każdą serią pomiarową motocykl był doprowadzany do ustalonej prędkości w sposób płynny, aby uniknąć wystąpienia niestabilności dynamicznych układu jezdnego.

#### **6.4. Analiza drgań oddziałujących na motocyklistę w dziedzinie czasu**

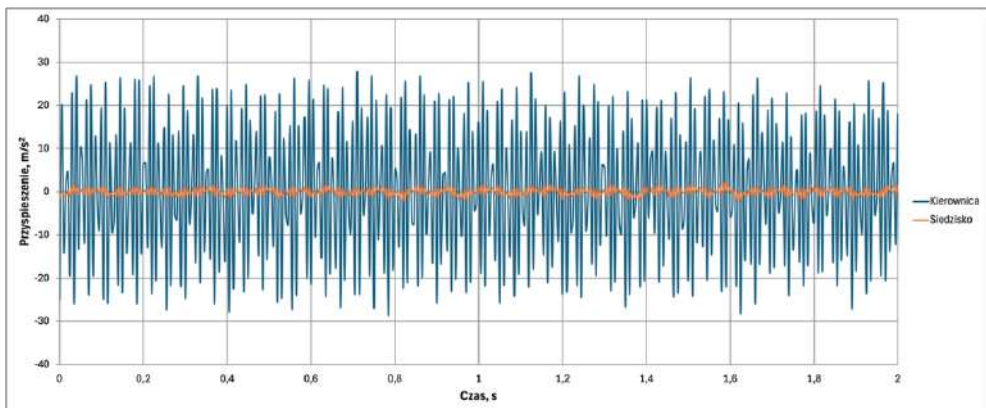
W rozdziale przedstawiono szczegółową analizę drgań oddziałujących na motocyklistę w dziedzinie czasu. Celem badań jest określenie, w jaki sposób drgania rejestrowane na kierownicy i na siedzisku podczas jazdy wpływają na kierowcę. Analiza przebiegów czasowych umożliwia identyfikację charakterystycznych cech sygnału oraz ocenę intensywności drgań w zależności od rodzaju nawierzchni i prędkości jazdy.

Analizę wyników przeprowadzono w zadanym paśmie roboczym sygnałów (po wstępnej filtracji), z zastosowaniem ważenia częstotliwościowego zgodnego z zaleceniami norm ISO 2631-1 (drgania ogólne, WBV) oraz ISO 5349-1 (drgania miejscowe, HAV). Uzyskane rezultaty są kluczowe dla oceny komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty oraz dla sformułowania rekomendacji konstrukcyjnych ukierunkowanych na ograniczanie niekorzystnego oddziaływania drgań.

Analiza wykresów przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu po różnych nawierzchniach ma na celu ocenę wpływu tych nawierzchni na komfort i bezpieczeństwo jazdy. W pierwszym etapie analizy zostały scharakteryzowane następujące parametry: odchylenie standardowe oraz największe chwilowe przyspieszenie zarejestrowane w kierunku pionowym. Odchylenie

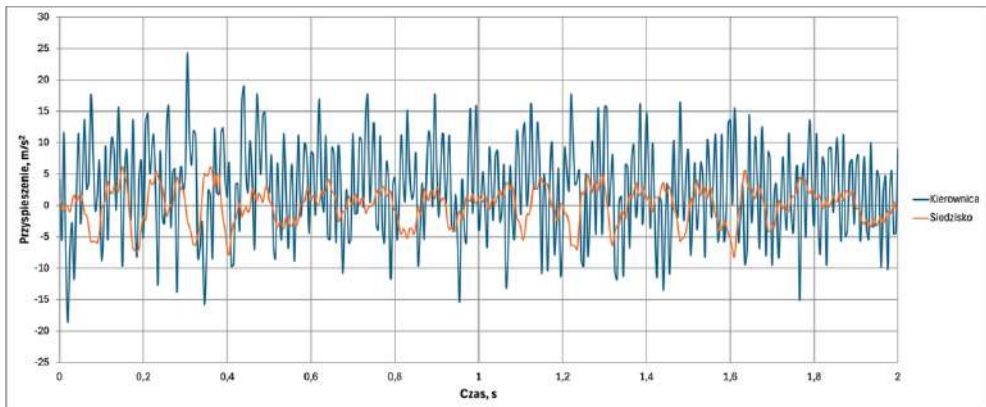
standardowe jest miarą rozproszenia danych i pozwala ocenić, jak bardzo zmieniają się przyspieszenia w czasie. Wyższe wartości odchylenia standardowego wskazują na większą zmienność przyspieszeń, co może świadczyć o większych drganiach i niższym komforcie jazdy. Największe chwilowe przyspieszenie to maksymalna wartość przyspieszenia zarejestrowana w trakcie pomiarów. Wysokie wartości tego parametru mogą wskazywać na gwałtowne wstrząsy, które mogą być niebezpieczne i niekomfortowe dla motocyklisty.

Dla drogi z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h (rys. 6.5) odchylenie standardowe przyspieszenia na kierownicy wynosi 19.35 m/s<sup>2</sup>, najwyższe chwilowe przyspieszenia na kierownicy wynosiły 28.56 m/s<sup>2</sup>. Na siedzisku motocykla odchylenie standardowe wynosi 1.11 m/s<sup>2</sup>, a najwyższe chwilowe przyspieszenia wynosiły 2.14 m/s<sup>2</sup>.



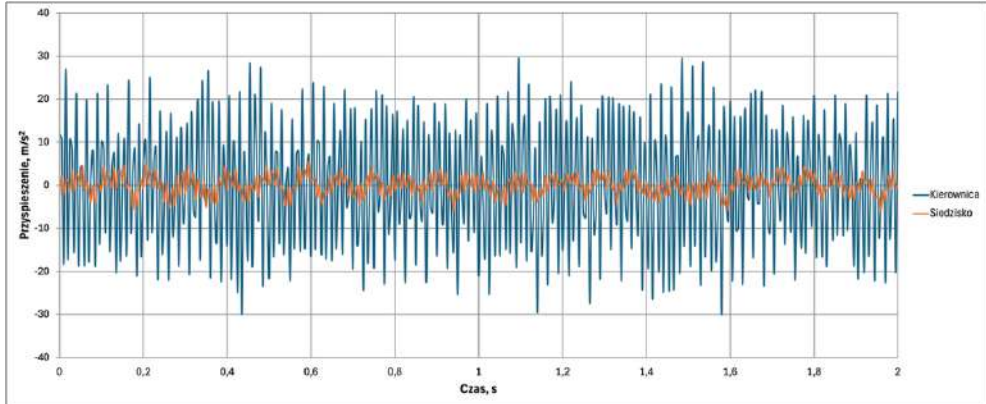
**Rys. 6.5** Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.

Dla drogi z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h (rys. 6.6) odchylenie standardowe przyspieszenia na kierownicy wynosi  $9.06 \text{ m/s}^2$ , najwyższe chwilowe przyspieszenia na kierownicy wynosiły  $24.27 \text{ m/s}^2$ . Na siedzisku motocykla odchylenie standardowe wynosi  $3.35 \text{ m/s}^2$ , a najwyższe chwilowe przyspieszenia wynosiły  $8.17 \text{ m/s}^2$ .



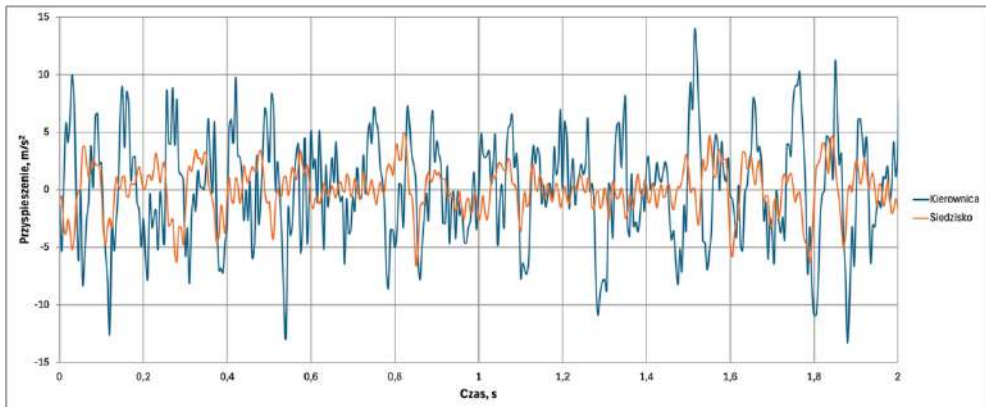
**Rys. 6.6** Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.

Dla drogi z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h (rys. 6.7) odchylenie standardowe przyspieszenia na kierownicy wynosi  $14.69 \text{ m/s}^2$ , najwyższe chwilowe przyspieszenia na kierownicy wynosiły  $30.16 \text{ m/s}^2$ . Na siedzisku motocykla odchylenie standardowe wynosi  $2.64 \text{ m/s}^2$ , a najwyższe chwilowe przyspieszenia wynosiły  $5.92 \text{ m/s}^2$ .



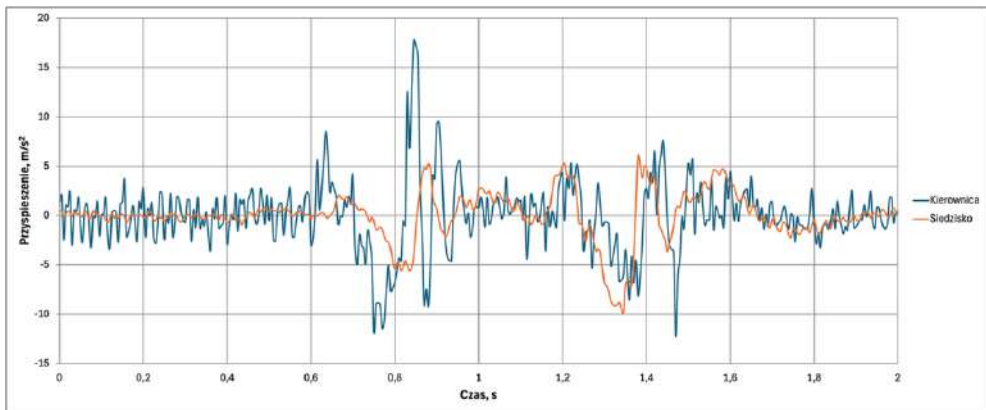
**Rys. 6.7** Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h.

Dla drogi z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h (rys. 6.8) odchylenie standardowe przyspieszenia na kierownicy wynosi  $4.51 \text{ m/s}^2$ , najwyższe chwilowe przyspieszenia na kierownicy wynosiły  $12.31 \text{ m/s}^2$ . Na siedzisku motocykla odchylenie standardowe wynosi  $2.02 \text{ m/s}^2$ , a najwyższe chwilowe przyspieszenia wynosiły  $7.79 \text{ m/s}^2$ .



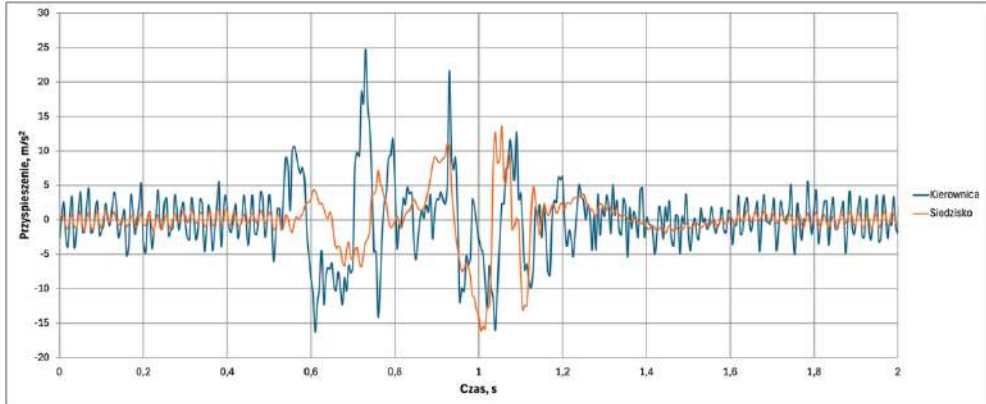
**Rys. 6.8** Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h.

Podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h (rys. 6.9) odchylenie standardowe przyspieszenia na kierownicy wynosi 3.11 m/s<sup>2</sup>, najwyższe chwilowe przyspieszenia na kierownicy wynosiły 17.74 m/s<sup>2</sup>. Na siedzisku motocykla odchylenie standardowe wynosi 2.11 m/s<sup>2</sup>, a najwyższe chwilowe przyspieszenia wynosiły 9.94 m/s<sup>2</sup>.



**Rys. 6.9** Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h.

Podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h (rys. 6.10) odchylenie standardowe przyspieszenia na kierownicy wynosi 5.68 m/s<sup>2</sup>, najwyższe chwilowe przyspieszenia na kierownicy wynosiły 24.74 m/s<sup>2</sup>. Na siedzisku motocykla odchylenie standardowe wynosi 3.76 m/s<sup>2</sup>, a najwyższe chwilowe przyspieszenia wynosiły 16.16 m/s<sup>2</sup>.



**Rys. 6.10** Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h.

W analizie danych dotyczących przyspieszeń motocykla na różnych nawierzchniach, największą wartość maksymalnego przyspieszenia na kierownicy zarejestrowano na nawierzchni z kostki brukowej, gdzie osiągnęło ono poziom aż  $30.16 \text{ m/s}^2$ . Wysoka wartość ta może być odzwierciedleniem szorstkości i nierówności kostki brukowej, które przekładają się na znaczne wstrząsy przekazywane na kierownicę. Natomiast najwyższe przyspieszenie na siedzisku kierowcy zaobserwowano podczas pokonywania progów zwalniających listwowych -  $16.16 \text{ m/s}^2$ , co świadczy o znaczącej sile oddziaływania tego typu przeszkód na komfort jazdy.

Wartości przyspieszeń na kierownicy motocykla, które reprezentowane są przez odchylenie standardowe, były największe na "gładkiej" nawierzchni asfaltowej, osiągając  $19.35 \text{ m/s}^2$ . Sugeruje to, że nawet na pozornie równej drodze mogą występować niespodziewane zagrożenia, powodujące nieprzewidywalne reakcje motocykla. Paradoksalnie, na tej samej nawierzchni zarejestrowano najniższe wartości odchylenia standardowego i maksymalnego przyspieszenia na siedzisku

(odpowiednio  $1.11 \text{ m/s}^2$  i  $2.14 \text{ m/s}^2$ ), co wskazuje na największy komfort jazdy w tym miejscu. Podkreślić należy, że prędkość jazdy ma znaczny wpływ na rozkład przyspieszeń - niższe prędkości na płytach betonowych i podczas przejazdu przez progi znacząco redukują przyspieszenia, co jest widoczne w obniżonych wartościach odchyłeń standardowych i maksymalnych przyspieszeń w porównaniu do pomiarów wykonanych przy wyższych prędkościach 50 km/h.

### **Ocena komfortu jazdy na podstawie wskaźnika RMS**

Tabela 6.1 przedstawia wartości średniego kwadratowego przyspieszenia RMS dla kierownicy i siedziska pojazdu na różnych rodzajach nawierzchni dróg. Wartości te są wyznaczane w trzech osiach: X, Y i Z, zarówno dla kierownicy, jak i siedziska. RMS jest miarą intensywności drgań, jakiej podlegają elementy pojazdu i może być używany do oceny komfortu jazdy oraz stanu technicznego nawierzchni.

**Tabela 6.1** Wartość RMS dla kierownicy i siedzisku na różnych nawierzchniach drogi

Rodzaj nawierzchni	Wartości RMS [m/s <sup>2</sup> ]					
	Kierownica			Siedzisko		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>Droga z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym</b>	5.23	3.27	17.59	2.65	4.25	1.00
<b>Droga z nawierzchnią o złym stanie technicznym</b>	11.18	8.63	45.39	2.65	2.38	3.51
<b>Droga z kostki brukowej</b>	5.03	5.28	14.85	2.52	2.56	2.16
<b>Droga z prefabrykowanych płyt betonowych</b>	4.89	3.98	4.30	1.70	1.64	2.08
<b>Droga z progiem podrzutowym do 10 km/h</b>	1.79	2.00	2.31	0.85	0.87	1.20
<b>Droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h</b>	2.92	2.77	3.02	1.32	1.63	1.88

Analiza wartości skutecznych przyspieszeń (RMS) zarejestrowanych na kierownicy i siedzisku motocykla dostarcza kluczowych informacji na temat intensywności drgań oddziałujących na użytkownika w różnych warunkach eksploatacyjnych. Parametr RMS, zgodnie z normami ISO 2631-1 oraz ISO 5349-1, stanowi podstawową miarę oceny ekspozycji człowieka na drgania zarówno ogólne, jak i miejscowe. Wysokość wartości RMS, obserwowana w poszczególnych kierunkach pomiarowych (X, Y, Z), odwzorowuje rzeczywiste obciążenia mechaniczne przenoszone z nawierzchni drogowej poprzez układ jezdny motocykla na ciało kierowcy. Szczególnie istotny jest kierunek Z (pionowy), który pozostaje dominującym

kanalem transmisji drgań z nawierzchni drogowej do organizmu użytkownika, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach pomiarowych.

Wartości RMS zarejestrowane na kierownicy charakteryzują się znaczną zmiennością zależną od rodzaju nawierzchni, przy czym najwyższe wartości we wszystkich kierunkach odnotowano na nawierzchniach o złym stanie technicznym. W osi Z osiągnięto poziom  $45.39 \text{ m/s}^2$ , wskazujący na ekstremalną intensywność drgań pionowych. Tak wysoki poziom drgań może wynikać z dynamicznych oddziaływań wynikających z przejazdu po nierównościach o dużej amplitudzie przy stosunkowo wysokiej prędkości, a także z ograniczonej skuteczności układu zawieszenia przedniego w tłumieniu impulsowych obciążeń. Nawierzchnie określone jako równe również generowały wysokie wartości ( $17.59 \text{ m/s}^2$  w osi Z), co może świadczyć o oddziaływaniu rezonansowym elementów układu kierowniczego lub znacznym udziale drgań generowanych przez jednostkę napędową. W kierunkach X i Y również obserwowano wartości przekraczające poziomy uznawane za komfortowe, co jednoznacznie wskazuje na istotne zagrożenie w zakresie drgań miejscowych oddziałujących na układ ręka–ramię.

Wartości RMS rejestrowane na siedzisku są zasadniczo znacznie niższe niż na kierownicy, co potwierdza skuteczniejsze tłumienie drgań przez układ zawieszenia tylnego oraz konstrukcję siedziska. Najwyższe wartości w osi Z odnotowano na nawierzchniach o złym stanie technicznym ( $3.51 \text{ m/s}^2$ ) oraz na kostce brukowej ( $2.16 \text{ m/s}^2$ ). Wielkości te, choć znacznie niższe niż wartości uzyskiwane na kierownicy, mogą przy długotrwałej ekspozycji prowadzić do zwiększonego obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego, zwłaszcza odcinka lędźwiowego kręgosłupa. W kierunkach X i Y na

siedzisku obserwowane wartości mieszczą się zazwyczaj w przedziale 1–3 m/s<sup>2</sup>, wskazując na umiarkowaną intensywność drgań. Zauważalną anomalią jest podwyższona wartość RMS w kierunku Y na nawierzchni równej (4.25 m/s<sup>2</sup>), która może wynikać z niekorzystnych zjawisk rezonansowych lub z lokalnej niespójności konstrukcyjnej siedziska.

Analiza porównawcza wykazała, że kierownica jest miejscem znacznie intensywniejszej transmisji drgań niż siedzisko, zwłaszcza w kierunku Z. Wskazuje to, że układ zawieszenia oraz masa własna motocykla skuteczniej redukują drgania przekazywane na tułów kierowcy niż te oddziałujące na jego kończyny górne. Zjawisko to ma istotne implikacje zdrowotne: ekstremalne wartości RMS rejestrowane na kierownicy stanowią potencjalne zagrożenie rozwojem schorzeń o charakterze naczyniowo-neurologicznym, charakterystycznych dla ekspozycji na drgania miejscowe (HAV). Siedzisko natomiast, mimo niższej intensywności drgań, pozostaje istotnym kanałem transmisji drgań ogólnych (WBV), mogących wpływać na przeciążenia struktur kręgosłupa. Różnice obserwowane pomiędzy punktami pomiarowymi podkreślają konieczność analizy zarówno drgań miejscowych, jak i ogólnych w procesie projektowania motocykli oraz oceny ergonomii ich użytkowania.

Zestawienie wartości RMS jednoznacznie wskazuje, że jakość nawierzchni drogowej ma fundamentalne znaczenie dla poziomu ekspozycji motocyklisty na drgania. Nawierzchnie o dobrym stanie technicznym generują wciąż relatywnie wysokie poziomy drgań na kierownicy, co sugeruje dominujący udział źródeł pochodzących z konstrukcji pojazdu (silnik, układ kierowniczy), natomiast nawierzchnie o złym stanie technicznym prowadzą do ponadnormatywnej ekspozycji zarówno w kontekście drgań miejscowych, jak i ogólnych. Wyniki te mają

bezpośrednie przełożenie na ocenę komfortu jazdy oraz bezpieczeństwa użytkownika, a ich interpretacja powinna stanowić podstawę do formułowania zaleceń konstrukcyjnych, obejmujących m.in. poprawę skuteczności tłumienia drgań, optymalizację mocowania kierownicy i siedziska oraz modyfikacje parametrów układu zawieszenia w celu ograniczenia transmisji drgań do ciała motocyklisty.

### **Ocena komfortu jazdy na podstawie wskaźnika VDV**

Tabela 6.2 przedstawia wartości przyspieszenia całkowitego VDV dla kierownicy i siedziska pojazdu na różnych rodzajach nawierzchni drogowych. Wartości te są mierzone w trzech osiach: X, Y i Z, zarówno dla kierownicy, jak i siedziska. VDV jest miarą intensywności drgań z uwzględnieniem czasu ich trwania, co pozwala na lepsze zrozumienie wpływu drgań na komfort jazdy oraz stan techniczny pojazdu. W przeciwieństwie do wskaźnika RMS, który reprezentuje wartość średnią skuteczną drgań, VDV jest bardziej wrażliwy na krótkotrwałe, gwałtowne wstrząsy. Dzięki temu lepiej odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacyjne, zwłaszcza na nawierzchniach o zmiennej jakości.

**Tabela 6.2** Wartość VDV dla kierownicy i siedziska na różnych nawierzchniach drogi

Rodzaj nawierzchni	Wartości VDV [ $m/s^{1.75}$ ]					
	Kierownica			Siedzisko		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>Droga z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym</b>	11.21	7.17	34.98	5.37	9.03	2.11
<b>Droga z nawierzchnią o złym stanie technicznym</b>	32.09	23.93	136.23	6.39	5.99	8.31
<b>Droga z kostki brukowej</b>	11.43	11.66	30.53	5.42	5.76	4.90
<b>Droga z prefabrykowanych płyt betonowych</b>	11.63	9.39	10.11	3.94	3.94	4.94
<b>Droga z progiem podrzutowym do 10 km/h</b>	6.16	5.81	7.29	2.17	2.17	4.64
<b>Droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h</b>	9.18	8.22	9.63	4.31	3.88	7.48

Wskaźnik Vibration Dose Value (VDV), wyrażany w jednostkach  $m/s^{1.75}$ , stanowi miarę całkowitej „dawki” drgań działającej na użytkownika w zadanym czasie ekspozycji i jest rekomendowany w normie ISO 2631-1 do oceny drgań o charakterze impulsowym. Zastosowanie czwartej potęgi przyspieszenia w definicji VDV powoduje, że wskaźnik ten jest wielokrotnie bardziej wrażliwy na krótkotrwałe wstrząsy niż klasyczna wartość skuteczna RMS. Analiza wartości VDV uzyskanych dla kierownicy i siedziska motocykla na różnych nawierzchniach drogowych pozwala zatem nie tylko na ocenę ogólnej intensywności drgań, ale przede wszystkim na identyfikację warunków, w których występują szczególnie niekorzystne, gwałtowne obciążenia dynamiczne.

W przypadku kierownicy najwyższe wartości VDV uzyskano na nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym w kierunku pionowym Z. Wartość dawki drgań osiągnęła poziom około  $136 \text{ m/s}^{1.75}$ , przy jednoczesnych bardzo wysokich wartościach w kierunkach X i Y (odpowiednio ok. 32 i  $24 \text{ m/s}^{1.75}$ ). Oznacza to występowanie licznych, silnych impulsów pionowych o dużej energii, których źródłem są przejazdy przez lokalne uskoki, zapadnięcia lub wyraźne deformacje jezdni. Nawierzchnia o dobrym stanie technicznym generowała wyraźnie niższe, choć nadal wysokie wartości VDV (ok.  $35 \text{ m/s}^{1.75}$  w osi Z), co sugeruje, że nawet przy geometrii uznawanej za równą występują dynamiczne obciążenia wynikające z pracy zawieszenia oraz drgań własnych układu kierowniczego. Kostka brukowa oraz prefabrykowane płyty betonowe dają relatywnie niższe wartości VDV na kierownicy (rzędu 30 i  $10 \text{ m/s}^{1.75}$  w osi Z), co należy wiązać z bardziej regularnym charakterem wymuszeń oraz mniejszą prędkością jazdy. Najniższe dawki drgań odnotowano przy przejeździe przez próg podrzutowy z prędkością do  $10 \text{ km/h}$ , co wynika z ograniczonej energii wymuszeń przy małej prędkości.

Analiza wartości VDV na siedzisku potwierdza, że układ zawieszenia tylnego i konstrukcja siedziska w znacznym stopniu redukują dawkę drgań działającą na tułów motocyklisty, jednak nie eliminują jej całkowicie. Dla nawierzchni o złym stanie technicznym odnotowano najwyższą wartość w kierunku pionowym Z, rzędu  $8\text{--}9 \text{ m/s}^{1.75}$ , co wskazuje na znaczące oddziaływanie impulsowych obciążeń na obszar miednicy i kręgosłupa lędźwiowego. Istotne są również wartości uzyskane dla przejazdu przez listwowy próg zwalniający w osi Z. Dawka drgań sięga ok.  $7\text{--}8 \text{ m/s}^{1.75}$ , co odzwierciedla pojedyncze, lecz bardzo intensywne uderzenia przy wyższej

prędkości przejazdu. Dla nawierzchni o dobrym stanie technicznym VDV na siedzisku pozostaje niskie w osi Z (ok.  $2 \text{ m/s}^{1.75}$ ), natomiast podwyższone wartości w kierunku Y sygnalizują obecność bocznych składowych drgań, mogących wynikać z mikro przemieszczeń nadwozia lub niewielkiej asymetrii w pracy zawieszenia.

Porównanie wartości VDV pomiędzy kierownicą, a siedziskiem jednoznacznie wskazuje, że kierownica jest głównym kanałem transmisji drgań impulsowych o wysokiej energii, zwłaszcza w kierunku pionowym. Dla nawierzchni o złym stanie technicznym dawka drgań w osi Z na kierownicy jest wielokrotnie wyższa niż na siedzisku, co ma bezpośrednie znaczenie w kontekście ryzyka wystąpienia skutków zdrowotnych typowych dla ekspozycji na drgania miejscowe układu ręka–ramię (HAV). Z kolei na siedzisku wartości VDV, choć niższe, stanowią istotne obciążenie z punktu widzenia drgań ogólnych (WBV) i mogą przy dłuższej ekspozycji sprzyjać przeciążeniom struktur kręgosłupa. Zależność ta potwierdza, że optymalizacja konstrukcji motocykla nie może ograniczać się wyłącznie do poprawy komfortu siedzenia, lecz powinna obejmować także redukcję drgań przenoszonych na układ kierowniczy.

Uzyskane wartości VDV należy traktować jako sygnał ostrzegawczy w kontekście komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty. Dawki drgań zarejestrowane na kierownicy, szczególnie na nawierzchniach o złym stanie technicznym, przekraczają typowe poziomy uważane za akceptowalne w długotrwałej eksploatacji i mogą prowadzić do przedwczesnego zmęczenia, obniżenia precyzji sterowania oraz zwiększonego ryzyka wypadku. Równocześnie wartości VDV na siedzisku wskazują, że przejazdy po zdegradowanej infrastrukturze drogowej oraz po elementach

wymuszających (progi zwalniające) generują istotne, impulsowe obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego. Wyniki te uzasadniają potrzebę zarówno działań infrastrukturalnych (utrzymanie odpowiedniej jakości nawierzchni), jak i poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie zawieszenia, mocowania kierownicy i siedziska oraz stosowania elementów wibroizolacyjnych, które ograniczą dawkę drgań przenoszonych na motocyklistę.

### **Ocena komfortu jazdy na podstawie wskaźnika RMQ**

Poniższa tabela 6.3 przedstawia wartości wskaźnika Root Mean Quad (RMQ) dla drgań mierzonych na kierownicy oraz siedzisku pojazdu, podczas jazdy po różnych typach nawierzchni drogowych. Wskaźnik RMQ został zastosowany w celu uwzględnienia wpływu drgań o wyższych wartościach amplitud na komfort jazdy. W porównaniu do RMS, wskaźnik RMQ jest bardziej czuły na krótkotrwałe, umiarkowanie intensywne impulsy. W odróżnieniu od VDV, który silnie reaguje na skrajne wstrząsy, RMQ zapewnia bardziej zrównoważoną ocenę drgań średniej intensywności. Dzięki temu RMQ może stanowić kompromisową miarę pomiędzy RMS a VDV w analizie komfortu jazdy. Dane w tabeli są przedstawione w trzech osiach (X, Y, Z) dla różnych rodzajów nawierzchni, takich jak nawierzchnia o dobrym stanie technicznym, nawierzchnia o złym stanie technicznym, kostka brukowa, płyty betonowe, progi podrzutowe oraz progi zwalniające. Analiza tych wartości pozwala na ocenę, jak różne warunki drogowe wpływają na poziom drgań, a tym samym na komfort i bezpieczeństwo użytkowników pojazdu.

**Tabela 6.3** Wartość RMQ dla kierownicy i siedziska na różnych nawierzchniach drogi

Rodzaj nawierzchni	Wartości RMQ					
	Kierownica			Siedzisko		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Droga z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym	6.30	4.03	19.67	3.02	5.08	1.19
Droga z nawierzchnią o złym stanie technicznym	18.04	13.46	76.61	3.59	3.37	4.67
Droga z kostki brukowej	6.43	6.56	17.17	3.05	3.24	2.76
Droga z prefabrykowanych płyt betonowych	6.53	5.28	5.69	2.22	2.21	2.78
Droga z progiem podrzutowym do 10 km/h	3.46	3.27	4.10	1.22	1.22	2.61
Droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h	5.16	4.62	5.42	2.42	2.18	4.20

Wartości RMQ rejestrowane na kierownicy wykazują bardzo wyraźną zależność od rodzaju nawierzchni, przy czym szczególnie wysoka intensywność drgań występuje na nawierzchniach o złym stanie technicznym. W kierunku Z wartość RMQ osiąga poziom 76.61, co świadczy o częstym występowaniu drgań o dużej amplitudzie i charakterze impulsowym. Również kierunki X i Y charakteryzują się wysokimi wartościami (18.04 oraz 13.46), co wskazuje, że drgania przenoszone przez układ kierowniczy są złożone i dominują nie tylko w osi pionowej, lecz także wzdłużnej i poprzecznej. Nawierzchnia o dobrym stanie technicznym generuje RMQ Z na poziomie 19.67, co jest wartością nadal wysoką w kontekście oddziaływania na rękę i przedramiona kierowcy i sugeruje potencjalne

zjawiska rezonansowe lub bliskość częstotliwości własnych układu kierowniczego. Nawierzchnie regularne, takie jak kostka brukowa czy płyty betonowe, dają umiarkowane wartości RMQ (ok. 17–6 w osi Z), co wskazuje na bardziej przewidywalny charakter wymuszeń.

Wartości RMQ rejestrowane na siedzisku są zauważalnie niższe niż te obserwowane na kierownicy, co potwierdza skuteczniejszą filtrację drgań przez układ zawieszenia tylnego. Najwyższe wartości RMQ na siedzisku występują na nawierzchni o złym stanie technicznym ( $Z = 4.67$ ) oraz na nawierzchniach z elementami wymuszającymi, np. listwowym progiem zwalniającym ( $Z = 4.20$ ). Choć wartości te są niższe niż dla kierownicy, ich charakter impulsowy może generować obciążenia szczególnie dotkliwe dla odcinka lędźwiowego kręgosłupa. W kierunkach X i Y wartości RMQ są znacznie bardziej umiarkowane (ok. 2–3.5), co oznacza, że boczne i wzdłużne składowe drgań mają mniejszy udział w ogólnej dawce dynamicznych obciążeń działających na siedzisko. Warto również zauważyć, że nawierzchnie gładkie generują jedne z najniższych wartości RMQ, co potwierdza poprawny stan techniczny tylnego zawieszenia.

Porównanie wartości RMQ pomiędzy kierownicą a siedziskiem jednoznacznie wskazuje, że to kierownica stanowi główny kanał transmisji drgań o charakterze impulsowym. Różnice są szczególnie widoczne w kierunku Z, gdzie RMQ jest nawet kilkunastokrotnie wyższe na kierownicy niż na siedzisku (np. 76.61 vs 4.67 na nawierzchni o złym stanie technicznym). Oznacza to, że układ kierowniczy, w odróżnieniu od tylnego zawieszenia, praktycznie nie tłumi szczytowych wymuszeń pojawiających się podczas jazdy po zdegradowanych nawierzchniach. W kierunkach X i Y obserwuje się również wielokrotnie wyższe wartości RMQ na kierownicy, co

wynika z bezpośredniego oddziaływania sił skrętnych, pulsacyjnej pracy silnika oraz ruchów własnych układu sterowania motocyklem. Siedzisko natomiast wykazuje zdecydowanie bardziej jednorodne wartości RMQ, co odzwierciedla skuteczność amortyzacji tylnego układu jezdnego, choć wciąż pozostaje podatne na impulsy pionowe.

Zestawienie wartości RMQ pozwala jednoznacznie stwierdzić, że największe obciążenia impulsowe są przenoszone na ręce motocyklisty poprzez kierownicę, co istotnie zwiększa ryzyko wystąpienia skutków zdrowotnych typowych dla ekspozycji na drgania miejscowe, takich jak zaburzenia czucia, zmiany naczyniowe i pogorszenie zdolności manualnych. Z kolei umiarkowane wartości RMQ rejestrowane na siedzisku wskazują, że główne obciążenia pionowe są skutecznie tłumione, choć w warunkach jazdy po nierównościach mogą stanowić zagrożenie dla dolnego odcinka kręgosłupa. Uzyskane wyniki podkreślają konieczność stosowania rozwiązań konstrukcyjnych minimalizujących występowanie krótkotrwałych impulsów drganiowych, takich jak poprawa charakterystyk tłumienia zawieszenia, wprowadzenie elementów wibroizolacyjnych w mocowaniu kierownicy oraz optymalizacja sztywności i geometrii siedziska. Wyniki RMQ stanowią zatem istotny element oceny komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty oraz stanowią podstawę do dalszych analiz numerycznych i eksperymentalnych.

## **6.5. Analiza drgań oddziałujących na motocyklistę w dziedzinie częstotliwości**

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę drgań oddziałujących na motocyklistę w dziedzinie częstotliwości, przeprowadzoną z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT) [91]. Celem analizy

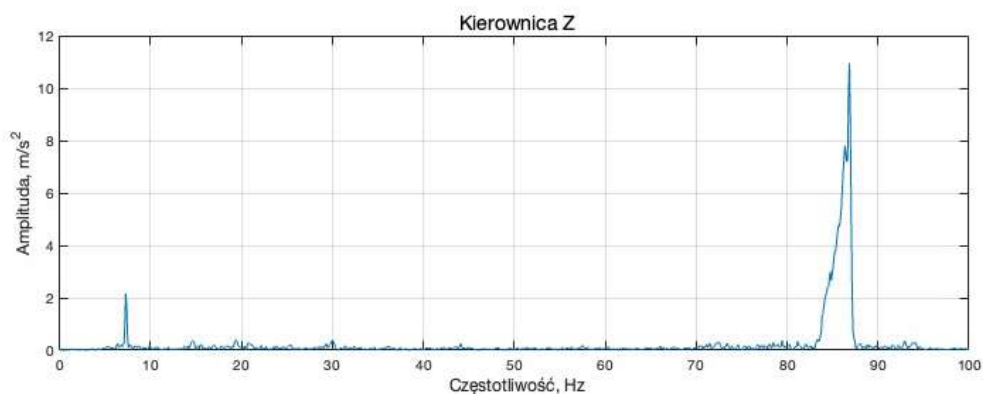
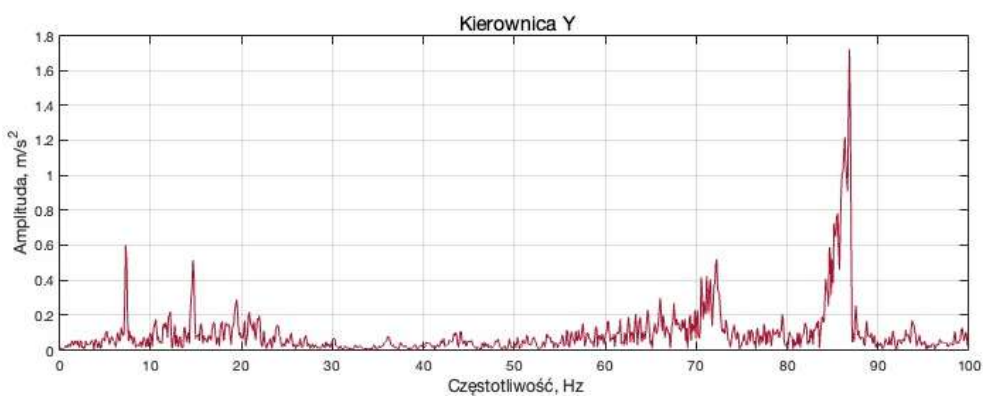
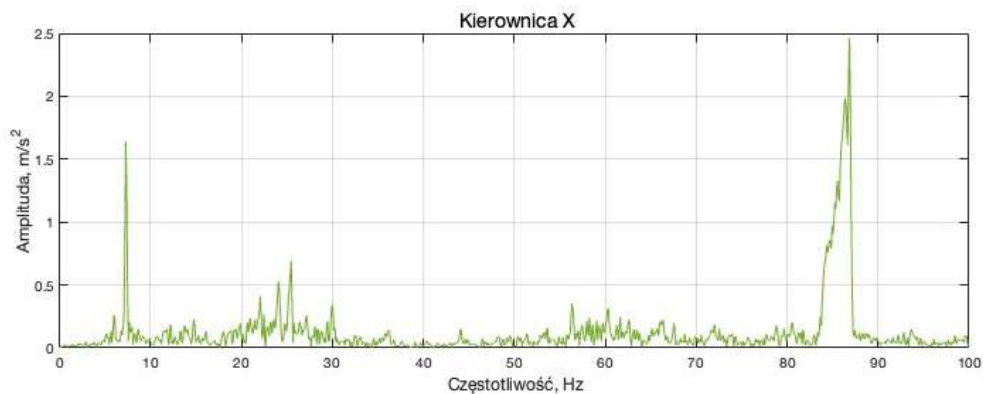
było określenie charakterystyk widmowych sygnałów przyspieszeń rejestrowanych na kierownicy oraz siedzisku motocykla podczas jazdy w różnych warunkach drogowych.

Analiza częstotliwościowa umożliwia identyfikację pasm częstotliwości, w których koncentruje się energia drgań, co ma kluczowe znaczenie dla oceny komfortu jazdy oraz potencjalnego wpływu drgań na zdrowie i bezpieczeństwo motocyklisty [92]. W szczególności istotne jest rozróżnienie składowych niskoczęstotliwościowych, związanych z ruchem bryły motocykla i pracą zawieszenia, oraz składowych średnio i wysokoczęstotliwościowych, które mogą wskazywać na rezonansowe wzbudzenie elementów konstrukcyjnych.

Do przetwarzania i analizy sygnałów wykorzystano środowisko Matlab R2023a. Zarejestrowane sygnały przyspieszeń poddano wstępnemu przetwarzaniu obejmującemu usunięcie składowej stałej (detrending) oraz zastosowanie okna Hann, a następnie obliczono jednostronne widma amplitudowe przy użyciu FFT. Należy podkreślić, że prezentowane wyniki stanowią widma amplitudowe przyspieszeń [ $m/s^2$ ], a nie gęstości widmowe mocy (PSD), co zostało jednoznacznie uwzględnione w interpretacji wyników.

Czas rejestracji każdej próbki wynosił 10 s, przy kroku próbkowania 0,005 s, co odpowiada częstotliwości próbkowania 200 Hz oraz liczbie próbek 2000. Zapewniło to rozdzielczość częstotliwościową równą 0,1 Hz oraz możliwość analizy widmowej w paśmie do 100 Hz, czyli do częstotliwości Nyquista.

Na wykresie 6.11 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) na kierownicy motocykla podczas jazdy po nawierzchni asfaltowej przy prędkości 50 km/h. Wykresy te pokazują, jak rozkłada się amplituda drgań w różnych częstotliwościach dla każdego z kierunków.



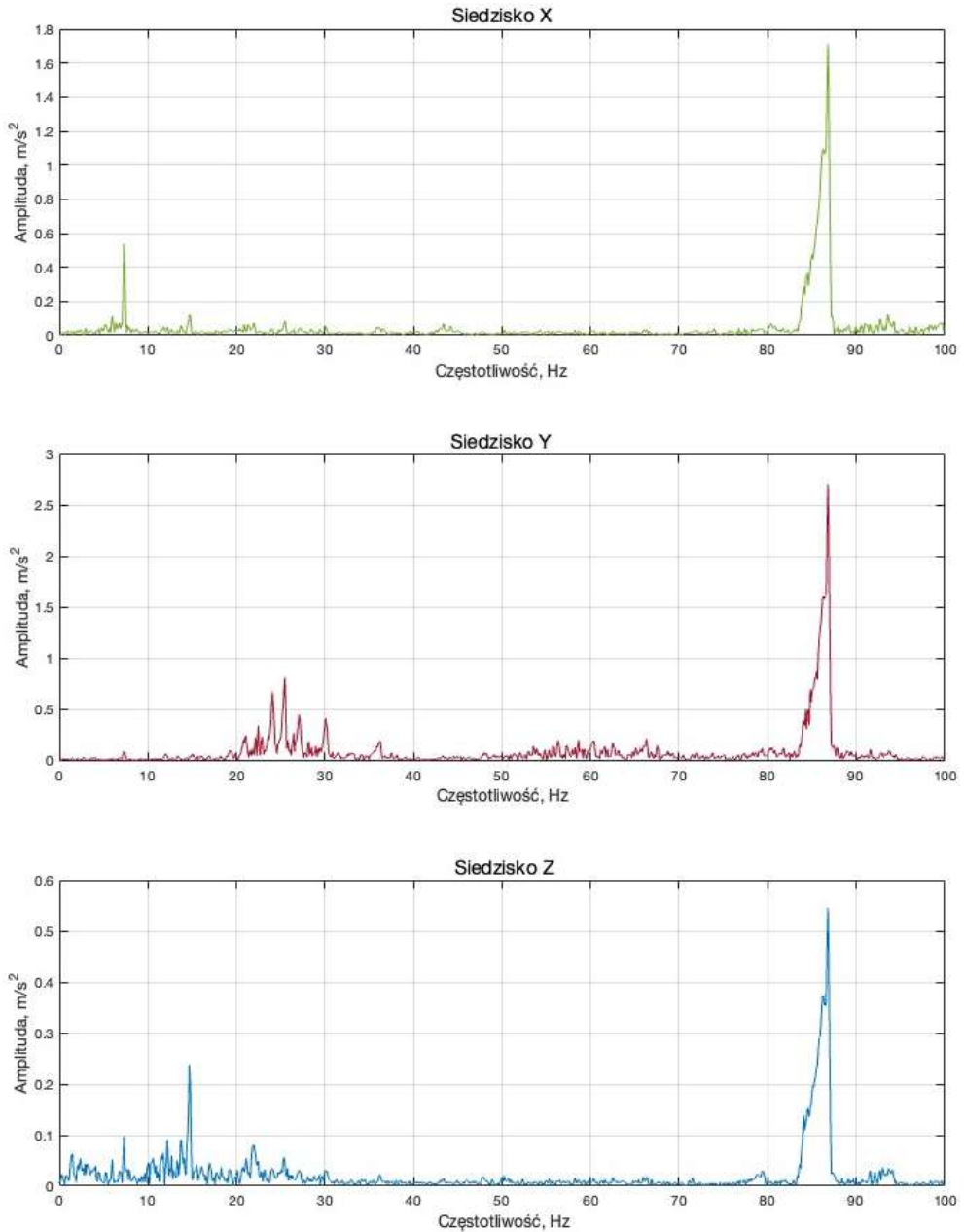
**Rys. 6.11** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h

W osi X widoczny jest wyraźny pik w zakresie niskich częstotliwości poniżej 10 Hz oraz dominujący pik w zakresie 84–88 Hz. Niskoczęstotliwościowa składowa odpowiada reakcji układu motocykl–zawieszenie na drobne nierówności nawierzchni, natomiast wyraźny pik wysokoczęstotliwościowy może wskazywać na rezonansowe wzbudzenie elementów układu kierowniczego lub ramy motocykla.

W osi Y obserwuje się analogiczny rozkład widma, z dominującym pikiem w okolicach 88 Hz, jednak o mniejszej amplitudzie w porównaniu do osi X. Oznacza to, że boczne drgania kierownicy są mniej intensywne, choć nadal obecne w tym samym paśmie rezonansowym.

W osi Z występuje bardzo wyraźny i dominujący pik w zakresie 84–88 Hz, o amplitudzie znacznie przewyższającej pozostałe osie. Świadczy to o dominacji pionowych drgań kierownicy w tym paśmie częstotliwości, co może mieć istotne znaczenie z punktu widzenia obciążeń przenoszonych na kończyny górne motocyklisty.

Na wykresie 6.12 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas jazdy po drodze z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h. Każdy wykres reprezentuje widmo amplitudowe przyspieszeń drgań w funkcji częstotliwości, co pozwala zrozumieć, jakie częstotliwości dominują w poszczególnych kierunkach.



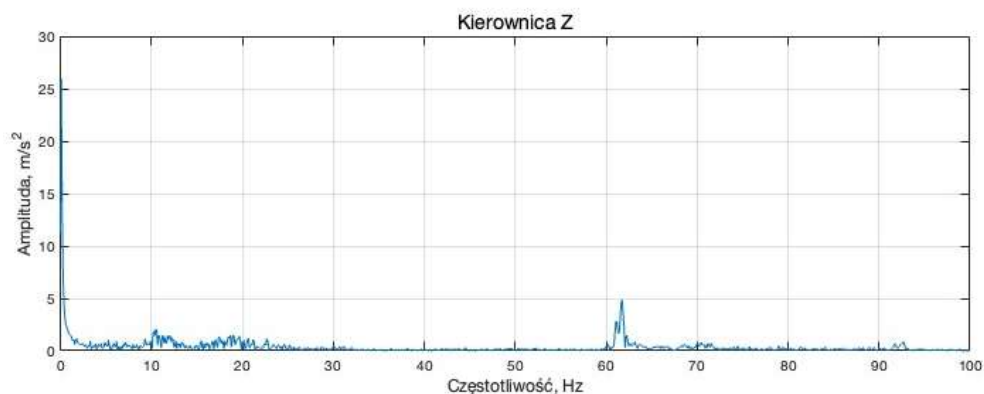
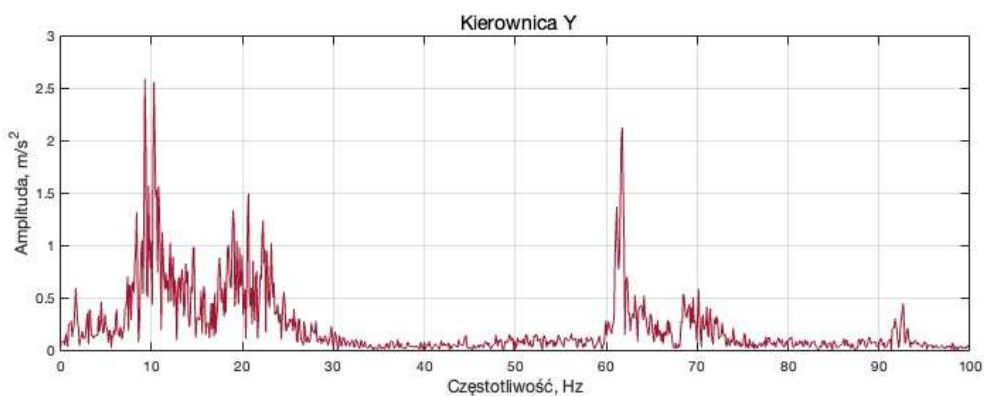
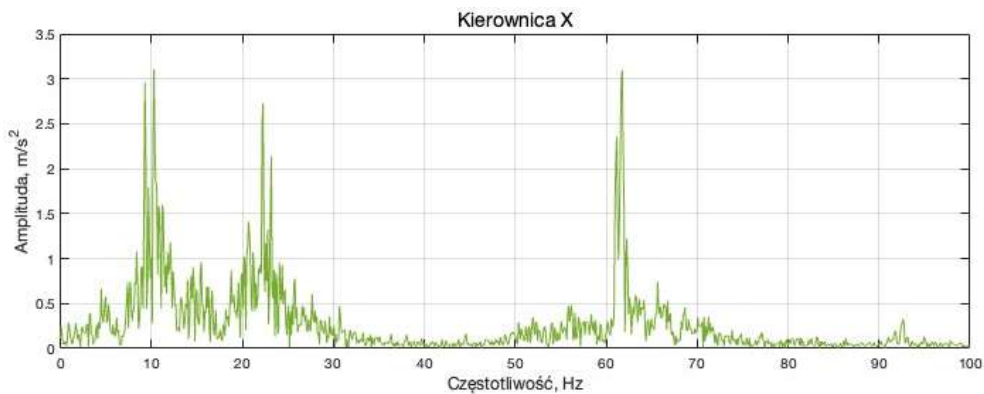
**Rys. 6.12** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h

W osi X amplitudy drgań są niewielkie w większości pasma, z widocznymi pikami poniżej 10 Hz oraz w zakresie 80–90 Hz. Oznacza to, że siedzisko skutecznie tłumi część drgań niskoczęstotliwościowych, jednak nadal przenosi składowe rezonansowe.

W osi Y dominują składowe w zakresie około 25 Hz oraz wyraźny pik w paśmie 80–90 Hz. Może to wskazywać na boczne ruchy siedziska wynikające z interakcji motocykla z nawierzchnią oraz z charakterystyki pracy tylnego zawieszenia.

W osi Z amplitudy są najmniejsze spośród analizowanych osi, co świadczy o relatywnie skutecznym tłumieniu pionowych drgań przez układ siedziska. Mimo to również w tej osi widoczny jest wyraźny pik rezonansowy w zakresie 80–90 Hz.

Na wykresie 6.13 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas jazdy po nawierzchni asfaltowej z wyraźnymi nierównościami przy prędkości 50 km/h. Celem analizy jest ocena charakterystyki drgań w poszczególnych osiach w odniesieniu do nierówności nawierzchni i dynamiki motocykla.



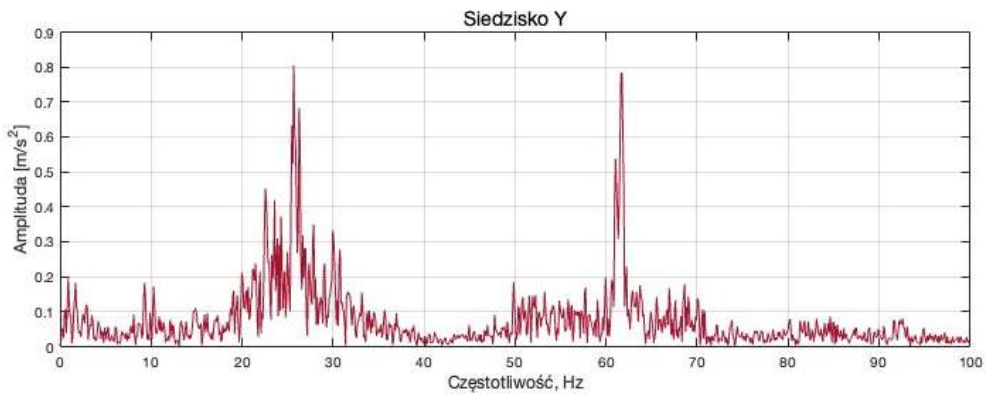
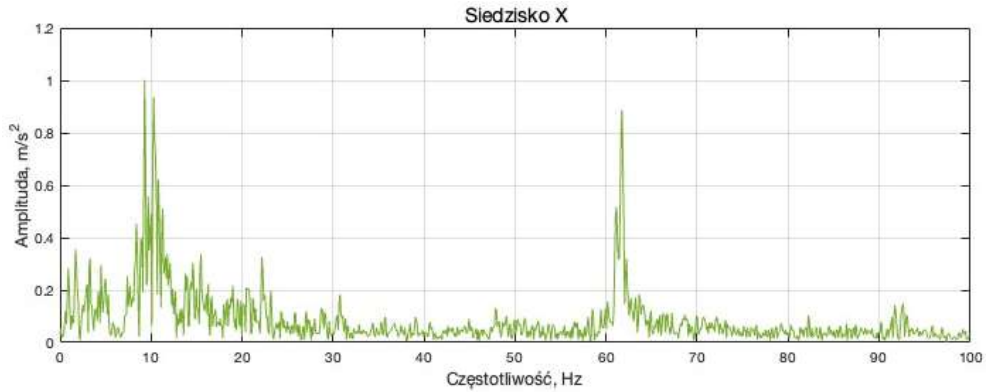
**Rys. 6.13** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h

W osi X występują liczne piki w zakresie 10–23 Hz oraz wyraźny pik w okolicach 60–63 Hz. Rozkład ten wskazuje na wzrost udziału drgań niskoczęstotliwościowych związanych z intensywniejszą pracą zawieszenia oraz na pojawienie się składowej rezonansowej w średnim zakresie częstotliwości.

W osi Y widoczne są piki w podobnym zakresie częstotliwości (10–20 Hz oraz ok. 62 Hz), jednak ich amplitudy są bardziej rozproszone. Sugeruje to, że boczne drgania kierownicy mają charakter mniej uporządkowany i mogą wynikać z nieregularnego charakteru nierówności nawierzchni.

W osi Z dominują składowe niskoczęstotliwościowe poniżej 20 Hz, co wskazuje na intensywne pionowe ruchy kierownicy wywołane bezpośrednim oddziaływaniem nierówności na zawieszenie przednie.

Na wykresie 6.14 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h. Analiza pozwala ocenić wpływ nierówności drogi na dynamikę siedziska oraz potencjalny komfort jazdy.



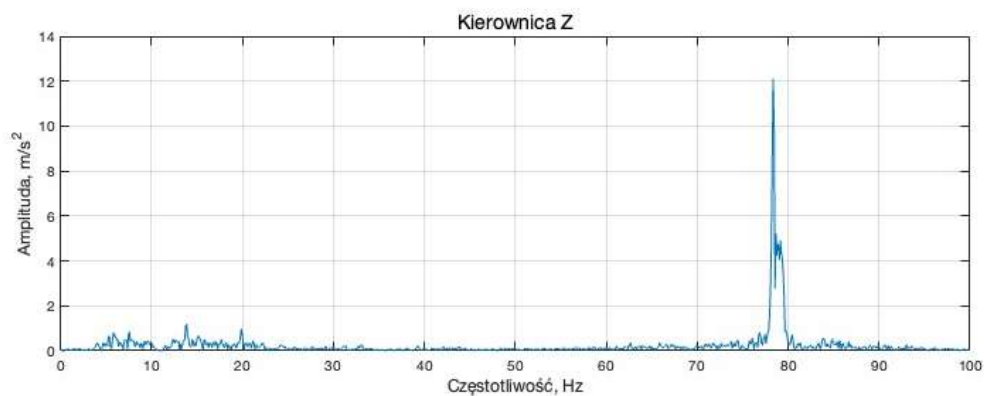
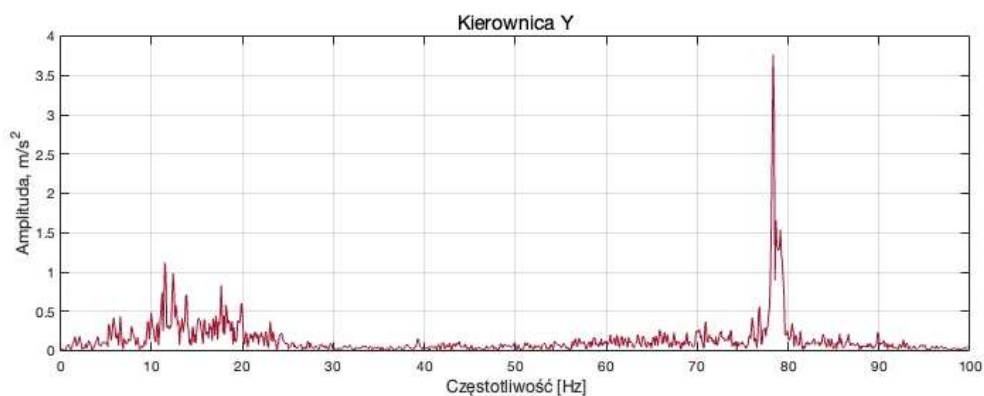
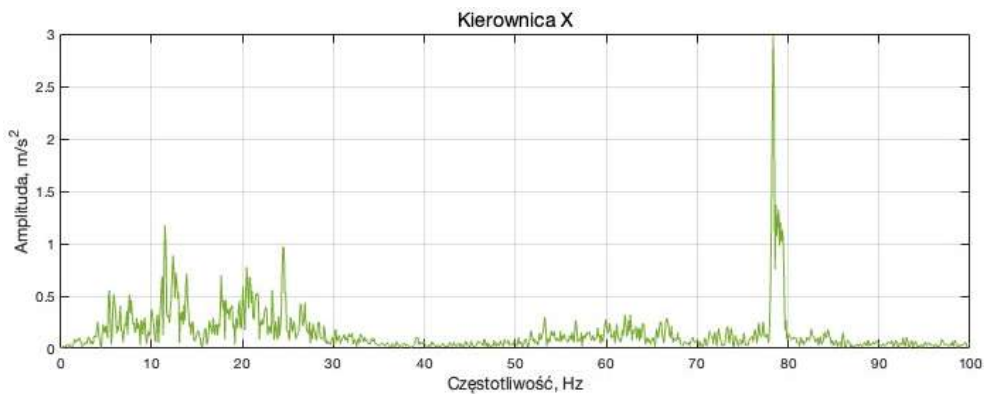
**Rys. 6.14** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h

W osi X widoczna jest dominacja pasma do ok. 20 Hz oraz wyraźna składowa w zakresie ok. 50–60 Hz. Składowe niskoczęstotliwościowe odpowiadają ruchom bryły motocykla i pracy tylnego zawieszenia, natomiast komponent w okolicach 50–60 Hz może wskazywać na pobudzenie konstrukcyjne elementów ramy lub układu mocowania siedziska.

W osi Y amplitudy koncentrują się głównie w zakresie ok. 10–30 Hz, co może wynikać z bocznych ruchów siedziska związanych z nierównomiernym obciążeniem układu jeźdnego oraz z przechyłami motocykla. W porównaniu do nawierzchni o dobrym stanie technicznym, w tym przypadku wyraźnie rośnie udział częstotliwości istotnych z punktu widzenia komfortu tułowia.

W osi Z najwyższe amplitudy występują poniżej 15 Hz, co wskazuje na dominację pionowych drgań siedziska, bezpośrednio istotnych dla komfortu bioder i kręgosłupa. Taki rozkład widma potwierdza, że nierówna nawierzchnia asfaltowa generuje warunki szczególnie niekorzystne w zakresie niskich częstotliwości.

Na wykresie 6.15 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z podczas jazdy po nawierzchni z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h. Wykresy te pokazują różnice w intensywności drgań w zależności od kierunku oraz charakterystyki nawierzchni.



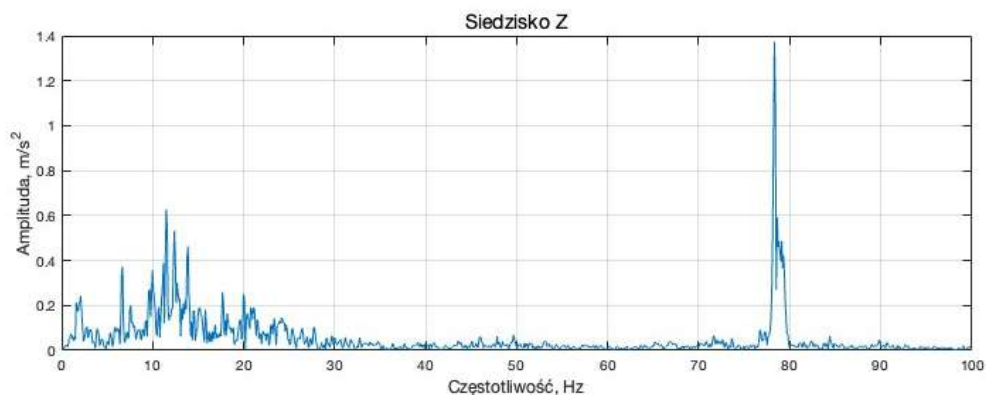
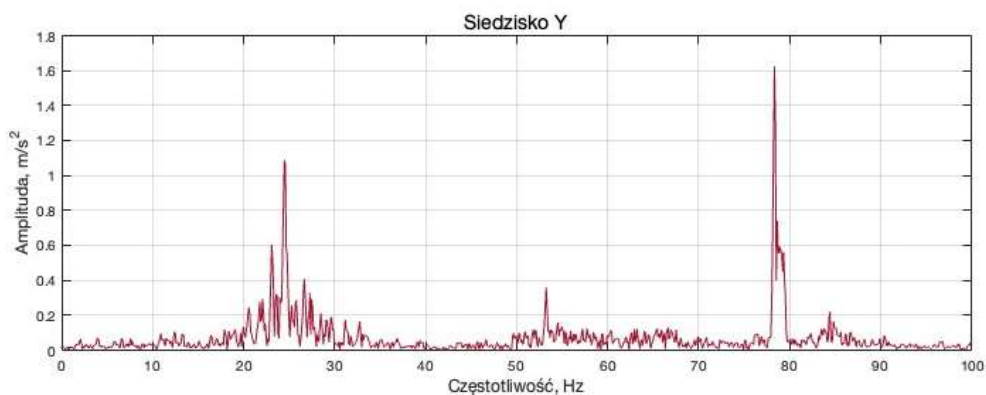
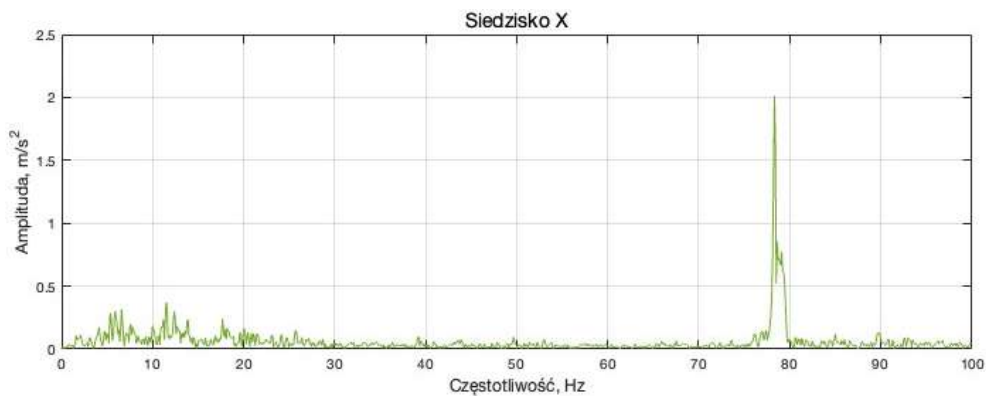
**Rys. 6.15** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h

W osi X widoczne są liczne składowe w zakresie 10–25 Hz oraz wyraźny, dominujący pik w okolicach ok. 80 Hz. Oznacza to, że oprócz odpowiedzi zawieszenia na nierówności (pasmo niskie) występuje silna składowa wysokoczęstotliwościowa, która może być związana z cyklicznym pobudzeniem układu kierowniczego przez charakterystyczną strukturę nawierzchni brukowej.

W osi Y obserwuje się analogiczny dominujący pik w pobliżu ok. 80 Hz oraz podwyższone amplitudy w paśmie 10–20 Hz. Boczne drgania kierownicy są mniej intensywne niż w osi Z, jednak wyraźna obecność piku wysokoczęstotliwościowego wskazuje na wspólne źródło pobudzenia w kilku kierunkach.

W osi Z występuje najwyższa amplituda piku w okolicach ok. 80 Hz, co potwierdza dominację pionowych wibracji kierownicy na kostce brukowej. Jest to szczególnie istotne w kontekście zmęczenia dłoni i przedramion, ponieważ długotrwała ekspozycja na taki charakter drgań może obniżać komfort i precyzję sterowania.

Na wykresie 6.16 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas jazdy po nawierzchni z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h. Wykresy przedstawiają amplitudę drgań w funkcji częstotliwości, co pozwala ocenić wpływ tej nawierzchni na komfort jazdy.



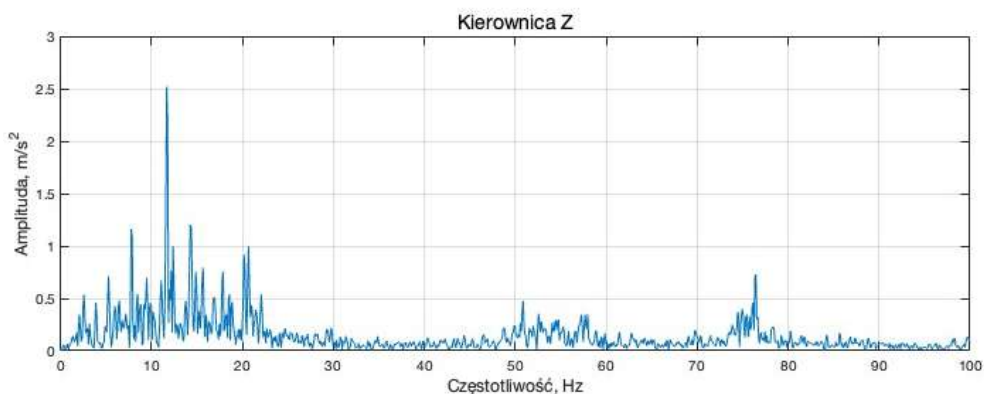
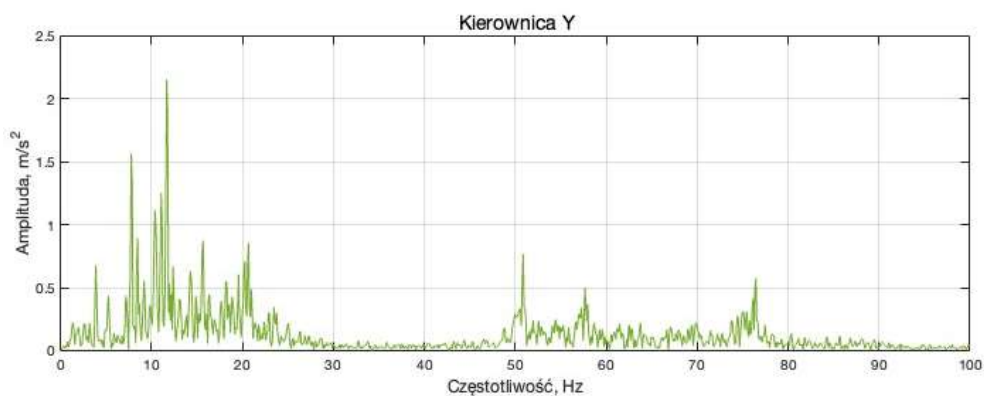
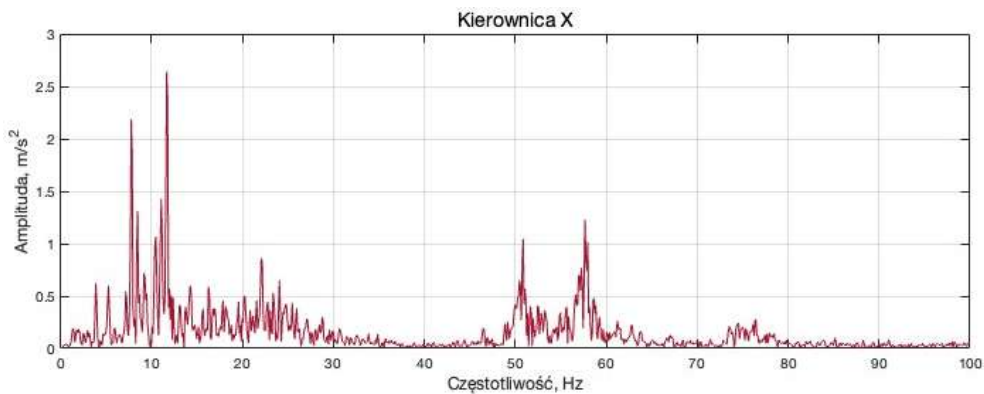
**Rys. 6.16** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h

W osi X widmo ma stosunkowo niski poziom tła, natomiast wyraźnie zaznacza się pik w okolicach ok. 80 Hz. Oznacza to, że siedzisko w ograniczonym stopniu przenosi niskie częstotliwości, ale pozostaje podatne na komponenty wysokoczęstotliwościowe przenoszone konstrukcyjnie przez ramę.

W osi Y widoczne są piki w zakresie ok. 20–30 Hz oraz dominujący pik ok. 80 Hz. Składowa ok. 20–30 Hz może wskazywać na boczne ruchy siedziska powiązane z pracą tylnego zawieszenia, natomiast komponent 80 Hz sugeruje udział drgań konstrukcyjnych wzbudzanych przez nawierzchnię brukową.

W osi Z amplitudy są najwyższe, zarówno w paśmie niskich częstotliwości (ok. 5–25 Hz), jak i w pobliżu 80 Hz. Taki obraz widma wskazuje, że kostka brukowa jest jedną z najbardziej niekorzystnych nawierzchni w kontekście pionowych drgań siedziska, bezpośrednio istotnych dla komfortu motocyklisty.

Na wykresie 6.17 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z podczas jazdy po nawierzchni z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h. Analiza uwzględnia amplitudy drgań w różnych częstotliwościach, co pozwala ocenić wpływ specyficznej nawierzchni na dynamikę motocykla.



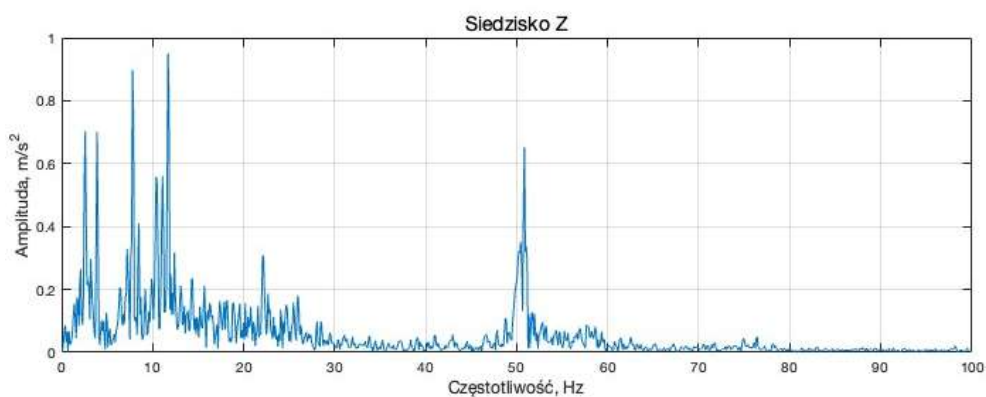
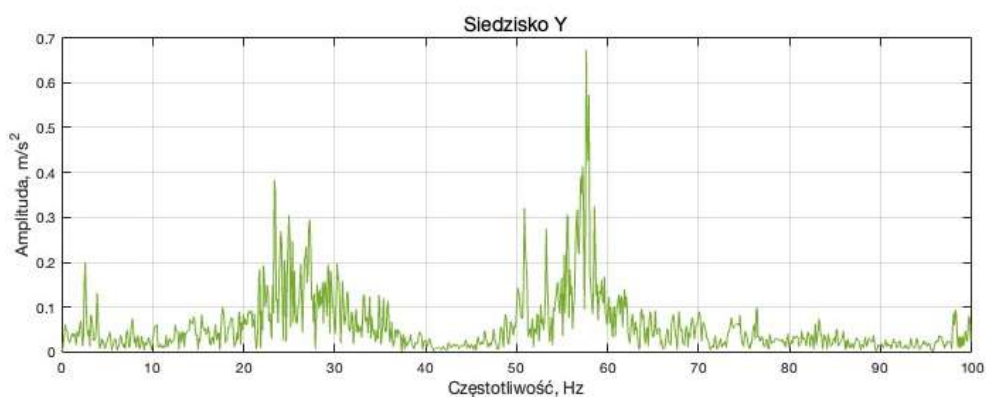
**Rys. 6.17** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h

W osi X dominują piki w zakresie ok. 10–20 Hz oraz widoczna jest składowa w okolicach ok. 50–60 Hz. Składowe niskoczęstotliwościowe są typowe dla odpowiedzi zawieszenia na cykliczne nierówności (łączenia płyt), natomiast pik w paśmie 50–60 Hz może wskazywać na pobudzenie elementów konstrukcyjnych w średnim zakresie częstotliwości.

W osi Y widoczne są piki w paśmie ok. 10–20 Hz, przy ogólnie mniejszych amplitudach niż w osi X. Oznacza to, że boczne drgania kierownicy na płytach betonowych są obecne, lecz mniej intensywne, co jest spójne z dominacją pionowego charakteru wymuszeń.

W osi Z największe amplitudy występują w paśmie 10–20 Hz, z dodatkowymi składowymi w okolicach 50 Hz. Wskazuje to, że nawet przy niższej prędkości (20 km/h) płyty betonowe generują wyraźne pionowe wymuszenia, które mogą być odczuwalne na kierownicy.

Na wykresie 6.18 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y i Z) podczas jazdy po nawierzchni z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h. Drgania te odzwierciedlają wpływ specyfiki nawierzchni na siedzisko motocykla oraz potencjalny komfort jazdy.



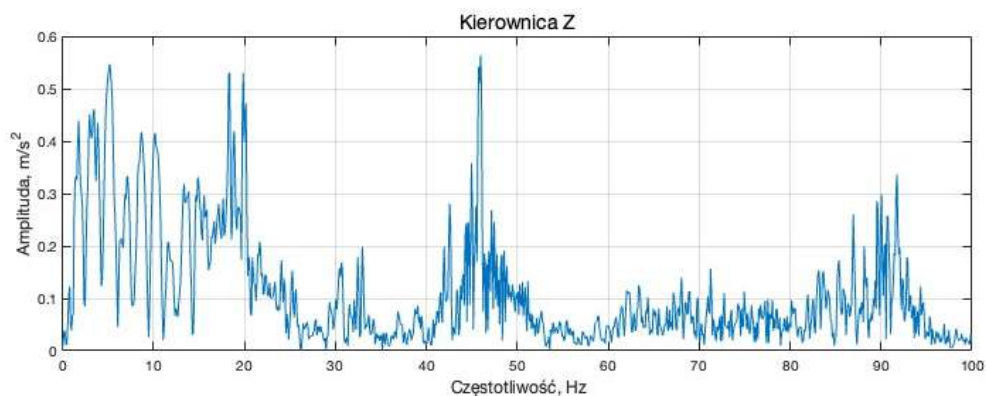
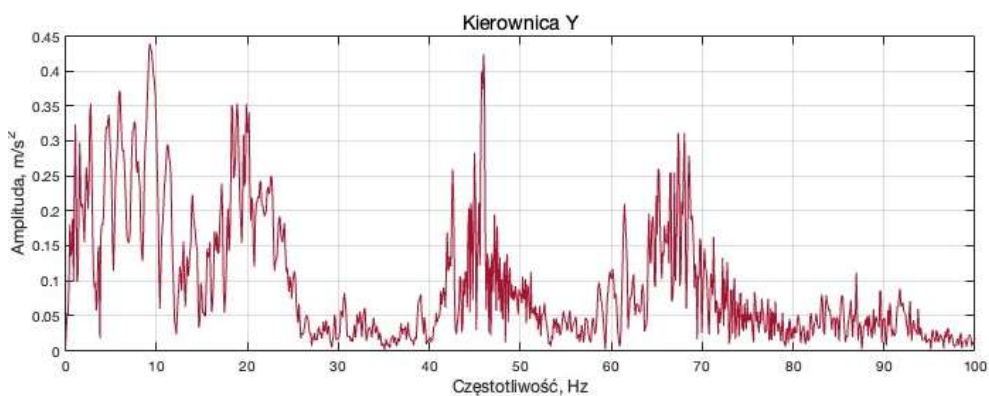
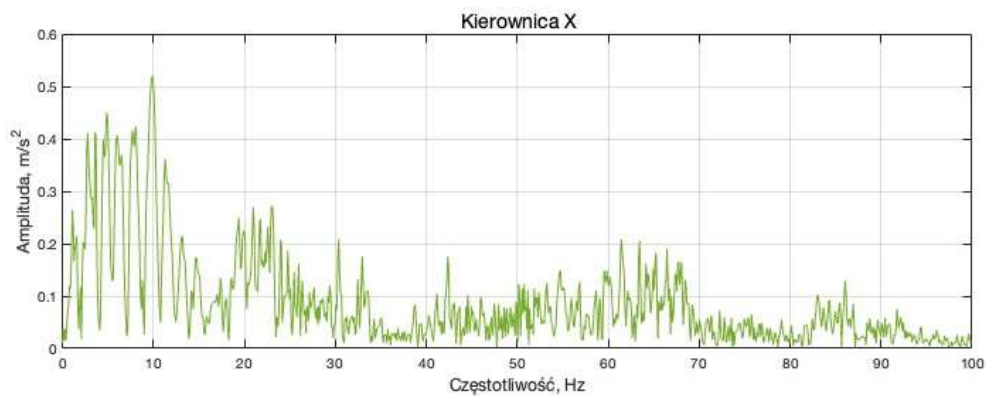
**Rys. 6.18** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h

W osi X występują piki w zakresie ok. 8–15 Hz oraz wyraźny, dominujący pik w okolicach ok. 50 Hz. Może to świadczyć o przenoszeniu drgań konstrukcyjnych do siedziska, przy jednoczesnym udziale niskich częstotliwości odpowiadających ruchom bryły motocykla.

W osi Y widoczne są składowe w paśmie ok. 20–30 Hz oraz rozbudowane pasmo w okolicach 50–60 Hz. Taki rozkład sugeruje, że siedzisko może przenosić boczne drgania wynikające z pracy tylnego zawieszenia oraz interakcji układu jezdnego z łączeniami płyt.

W osi Z amplitudy są najwyższe w niskich częstotliwościach (ok. 5–20 Hz), a dodatkowo zaznacza się składowa w okolicach 50 Hz. Wskazuje to na dominację pionowego charakteru drgań siedziska, który w przypadku nawierzchni z płyt betonowych może w istotnym stopniu wpływać na komfort motocyklisty.

Na wykresie 6.19 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas przejazdu przez próg podrzutowy z prędkością 10 km/h. Wykresy pokazują amplitudę drgań w zależności od częstotliwości, co pozwala ocenić, jak próg wpływa na zachowanie motocykla w różnych osiach.



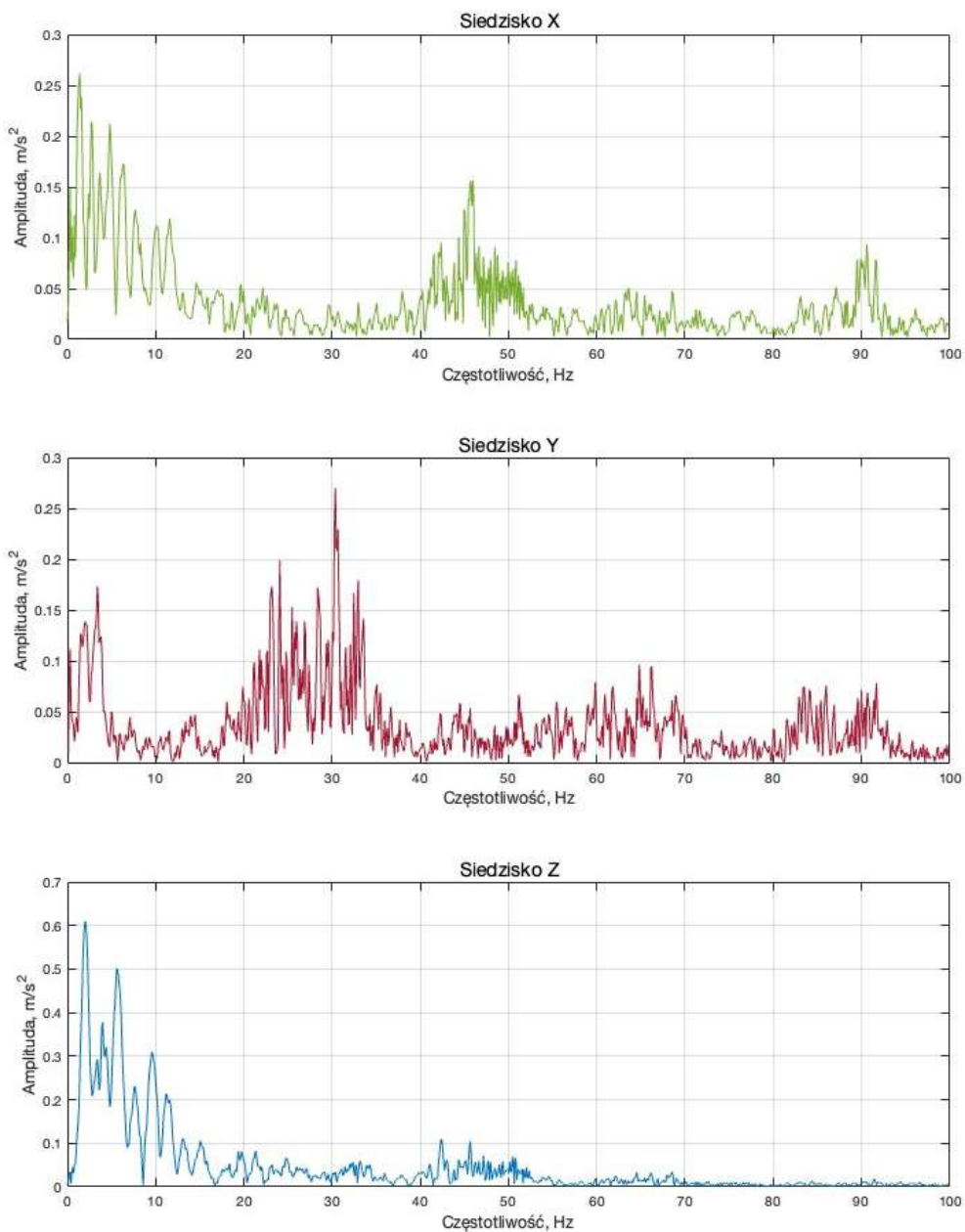
**Rys. 6.19** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h

W osi X widoczne są wysokie amplitudy w paśmie niskich częstotliwości, szczególnie do ok. 30 Hz, a także rozproszone składowe w paśmie średnim (ok. 40–70 Hz). Niskie częstotliwości odpowiadają odpowiedzi układu na udarowy charakter wymuszenia, natomiast pasmo średnie może odzwierciedlać drgania „dochodzące” po impulsie oraz lokalne wzbudzenia elementów konstrukcyjnych.

W osi Y obserwuje się istotne amplitudy w zakresie ok. 10–25 Hz oraz wyraźniejsze pasma w okolicach 50–70 Hz. Zwiększony udział osi Y może wynikać z nieidealnej symetrii najazdu na próg oraz chwilowych przechyłów motocykla, które generują komponent boczny w odpowiedzi kierownicy.

W osi Z dominują składowe niskoczęstotliwościowe, przy jednoczesnym pojawianiu się silniejszych pików w zakresie ok. 45–55 Hz oraz w wyższych częstotliwościach. Taki rozkład jest typowy dla zdarzeń udarowych: energia impulsu rozkłada się szerokopasmowo, a pionowa odpowiedź kierownicy ma największe znaczenie dla obciążenia rąk motocyklisty.

Na wykresie 6.20 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas przejazdu przez próg podrzutowy z prędkością 10 km/h. Analiza częstotliwościowa umożliwia ocenę wpływu tej specyficznej nierówności na dynamikę siedziska oraz komfort kierowcy.



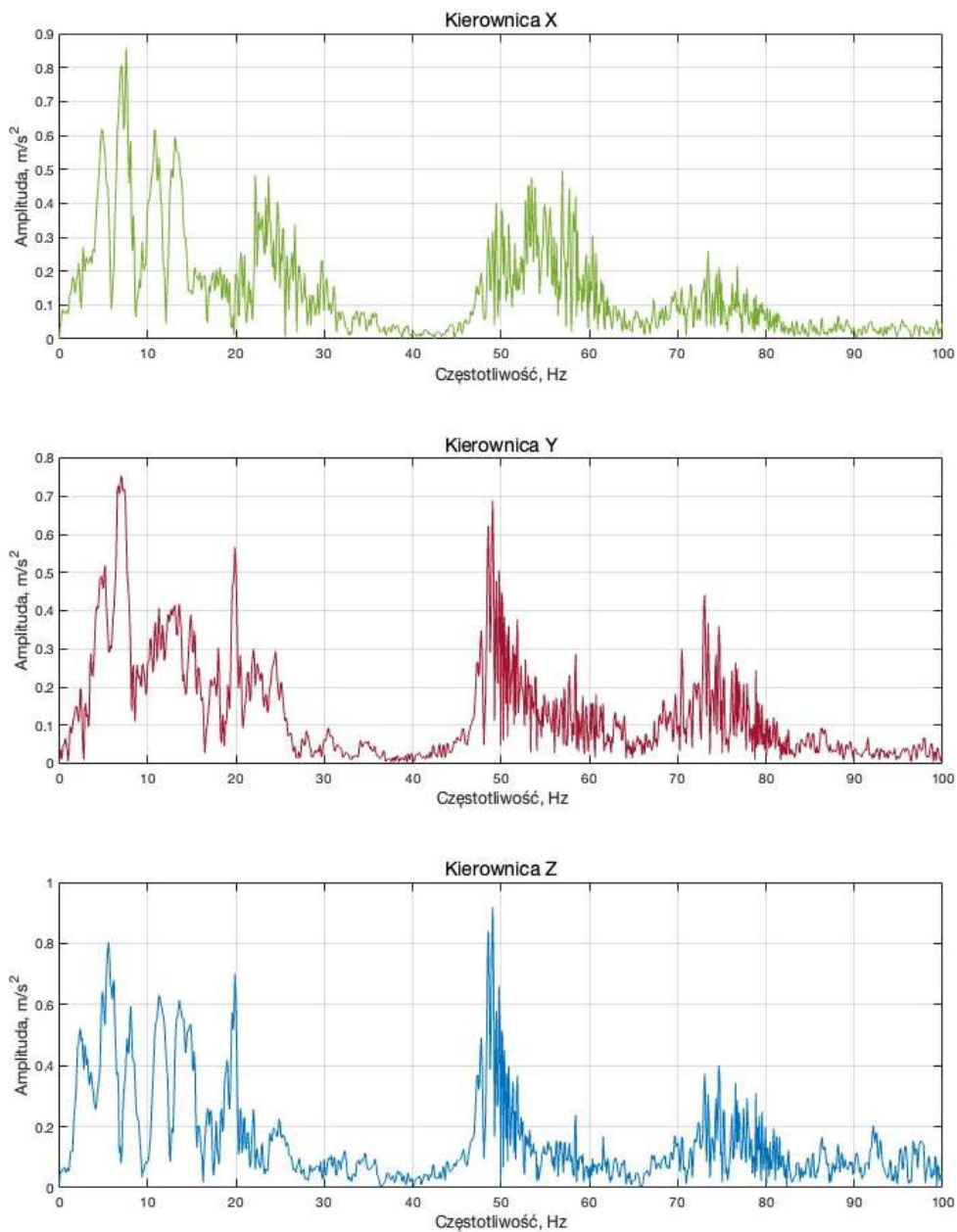
**Rys. 6.20** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h

W osi X najwyższe amplitudy koncentrują się poniżej ok. 15 Hz, a dodatkowo widoczna jest składowa w paśmie ok. 50 Hz oraz niewielkie wzmocnienie w wyższych częstotliwościach. Oznacza to, że w odpowiedzi siedziska dominuje komponent niskoczęstotliwościowy związany z ruchem bryły motocykla po przejeździe przez przeszkodę.

W osi Y zaznacza się szerokie pasmo ok. 20–40 Hz, co może świadczyć o znaczącym udziale bocznych ruchów siedziska w trakcie przejazdu przez próg. Jest to szczególnie istotne, ponieważ drgania boczne mogą wpływać na stabilność pozycji motocyklisty i subiektywne odczucie „szarpnięcia” podczas przejazdu.

W osi Z amplitudy są wyraźnie największe w zakresie bardzo niskich częstotliwości (ok. 0–10 Hz), a w pozostałym paśmie drgania są znacznie bardziej stłumione. Oznacza to, że siedzisko przenosi przede wszystkim wolniejsze, pionowe ruchy bryły motocykla po impulsie udarowym, co bezpośrednio wpływa na komfort tułowia.

Na przedstawionych wykresach 6.21 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h. Wykresy ukazują amplitudy drgań w różnych częstotliwościach, co pozwala na ocenę wpływu tej przeszkody na dynamikę motocykla.



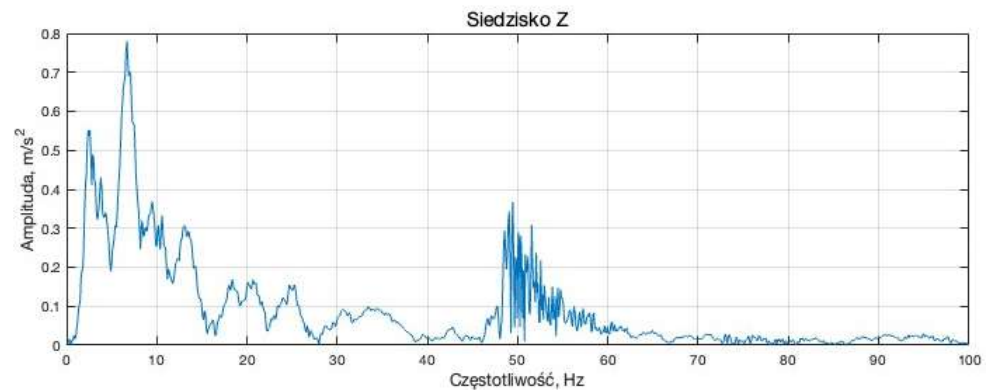
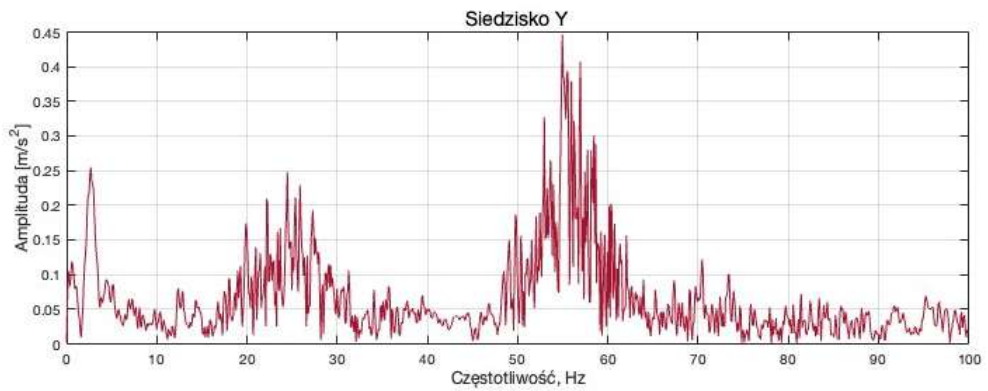
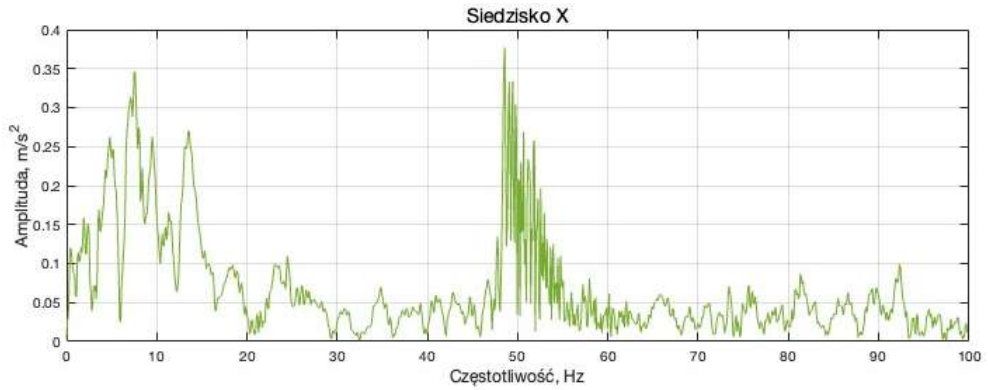
**Rys. 6.21** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h

W osi X dominują piki w zakresie ok. 8–25 Hz, a dodatkowo widoczne jest wzmocnienie w paśmie ok. 50–60 Hz. Składowe niskoczęstotliwościowe wynikają z odpowiedzi zawieszenia na przejazd przez elementy listwowe, natomiast pasmo 50–60 Hz może wskazywać na pobudzenie elementów konstrukcyjnych w średnich częstotliwościach.

W osi Y obserwuje się podobny charakter widma, z wyraźnym pasmem ok. 8–25 Hz oraz wzmocnieniem w zakresie 50–80 Hz. Zwiększona aktywność w osi bocznej może wynikać z lokalnych nierównomierności kontaktu opony z listwami oraz z chwilowych odchyień kierownicy podczas przejazdu.

W osi Z widoczne są wysokie amplitudy w zakresie niskich częstotliwości oraz wyraźny komponent w paśmie ok. 48–52 Hz. Oznacza to, że pionowe wymuszenie generowane przez próg listwowy przenosi się na kierownicę zarówno jako odpowiedź niskoczęstotliwościowa, jak i jako komponent w średnim paśmie, potencjalnie związany z drganiami konstrukcyjnymi.

Na wykresach 6.22 przedstawiono widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach (X, Y, Z) podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h. Analiza pokazuje wpływ tej przeszkody na amplitudy drgań w różnych osiach siedziska, co może mieć znaczenie dla komfortu jazdy i dynamiki pojazdu.



**Rys. 6.22** Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h

W osi X występują podwyższone amplitudy w niskich częstotliwościach (do ok. 5–15 Hz) oraz wyraźne pasmo w okolicach 50–65 Hz. Składowe te wskazują na przenoszenie do siedziska zarówno ruchów bryły motocykla, jak i komponentów drgań konstrukcyjnych pochodzących z interakcji układu jezdnego z progiem.

W osi Y widoczny jest rozbudowany zakres ok. 20–40 Hz oraz wyraźne wzmocnienie w pasmie ok. 50–60 Hz. Taki rozkład sugeruje, że próg listwowy generuje istotne drgania boczne siedziska, które mogą pogarszać subiektywne odczucie stabilności podczas przejazdu.

W osi Z dominują bardzo niskie częstotliwości (ok. 0–10 Hz), a dodatkowo występuje wyraźny komponent w okolicach 50–60 Hz. Oznacza to, że pionowe drgania siedziska mają charakter zarówno wolnych ruchów bryły pojazdu po przejeździe przez przeszkodę, jak i bardziej „konstrukcyjnego” pobudzenia w średnim paśmie częstotliwości.

Przeprowadzone analizy wykazały, że we wszystkich analizowanych przypadkach dominującą rolę odgrywają drgania w osi Z, zarówno na kierownicy, jak i na siedzisku motocykla. Drgania te są szczególnie intensywne w niskich częstotliwościach (<20 Hz) w przypadku nierównych nawierzchni i progów oraz w pasmach 50–60 Hz i 80–90 Hz, które można wiązać z rezonansowym wzbudzeniem elementów konstrukcyjnych [93].

Nawierzchnie o dobrym stanie technicznym generują relatywnie niewielkie drgania niskoczęstotliwościowe, jednak nadal ujawniają rezonanse w wyższych pasmach. Nawierzchnie brukowe, betonowe oraz progi powodują istotny wzrost amplitud drgań, szczególnie pionowych, co może prowadzić do zwiększonego zmęczenia motocyklisty oraz pogorszenia stabilności i precyzji prowadzenia pojazdu.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na konieczność optymalizacji układów zawieszenia oraz elementów tłumiących drgania, ze szczególnym uwzględnieniem redukcji drgań niskoczęstotliwościowych i ograniczenia rezonansów w średnich i wysokich pasmach częstotliwości.



## **7. Stanowiskowe badania eksperymentalne do oceny drgań**

W niniejszym rozdziale przedstawiono stanowisko badawcze, które zostało rozbudowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Opisano jego konstrukcję, zastosowane technologie oraz metodykę przeprowadzania testów. Stanowisko zaprojektowano i rozwinięto z myślą o precyzyjnej analizie drgań, której celem jest uzyskanie wiarygodnych i szczegółowych wyników możliwych do wykorzystania w procesie poprawy komfortu oraz bezpieczeństwa kierowcy motocykla [94].

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i rozbudowane na bazie istniejącego stanowiska, które zostało zbudowane w 2000 roku przez dr. Andrzeja Zuskę. Oryginalna konstrukcja składała się z płyty technologicznej, układu wodząco-prowadzącego oraz belki poprzecznej. Pozostałe elementy konstrukcyjne zostały szczegółowo zaplanowane i wykonane w sposób umożliwiający możliwie wierne odwzorowanie rzeczywistych warunków drgań oddziałujących na motocykl podczas jego eksploatacji [95].

Na podstawie przeglądu dotychczas opracowanych stanowisk badawczych przeznaczonych do analizy drgań w motocyklach można stwierdzić, że stanowisko opracowane w Laboratorium Samochodów i Ciągników Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach charakteryzuje się unikalnymi cechami konstrukcyjnymi rzadko spotykanymi w literaturze przedmiotu. Jego innowacyjność wynika przede wszystkim z nietypowego sposobu mocowania motocykla na stanowisku, który umożliwia wierne odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Dodatkowo stanowisko to stwarza możliwość prowadzenia badań zarówno z wykorzystaniem manekina antropomorficznego, jak i z udziałem

rzeczywistego użytkownika umieszczonego na motocyklu, co istotnie zwiększa wartość poznawczą uzyskiwanych wyników w kontekście oceny oddziaływania drgań na organizm człowieka.

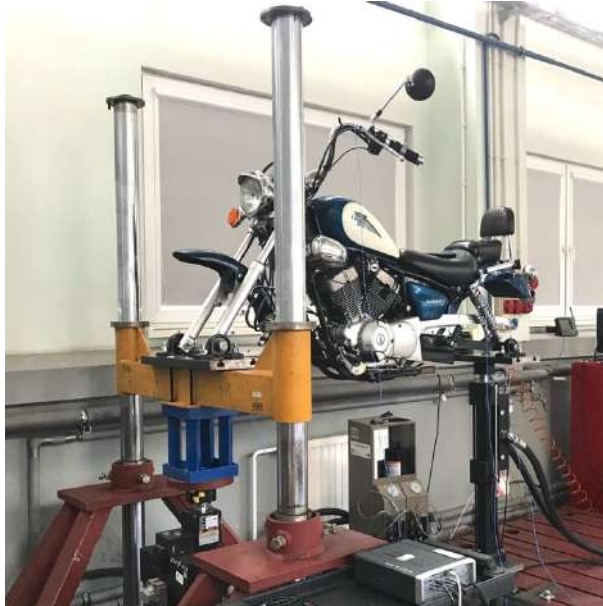
Stanowisko badawcze do symulacyjnych badań motocykli, zbudowane na bazie wzбудników elektrohydraulicznych firmy MTS, zostało przedstawione na rysunku 7.1. Składa się z kilku współpracujących ze sobą układów, do których należą:

- dwa pulsatory elektrohydrauliczne firmy MTS Model 244.12 wraz z serwozaworami MTS Model 252.25,
- zespół hydraulicznego rozdzielacza firmy MTS Model 293,
- zespół zasilania hydraulicznego firmy MTS Model Silent flow 505.20,
- układ kontrolno-sterowniczy firmy MTS Model FlexTest 60 Controller wraz z oprogramowaniem firmy MTS Series 793 Software w dodatkowo wyposażone oprogramowanie Moog Replication Software Module.
- układ wodząco prowadzący wraz z zespołem montażowym przedniego widelca pojazdów jednośladowych,
- zespół montażowy wahaczy pojazdów jednośladowych.



**Rys. 7.1** Stanowisko badawcze do symulacyjnych badań pojazdów jednośladowych

Układ wodząco-prowadzący, znajdujący się w Laboratorium Samochodów i Ciągników Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, stanowił podstawę do budowy stanowiska do symulacyjnych badań motocykli. Istniejące części stanowiska, opisane w literaturze [96], [97], zostały uzupełnione o dodatkową płytę wraz z zespołem łożysk. Element ten zamocowano do belki poprzecznej, tworząc rozszerzenie układu wodząco-prowadzącego. Układ ten, przedstawiony na rysunku 7.2, składa się z dwóch pionowych słupów pełniących funkcję prowadnic belki poprzecznej, osadzonych w specjalnych stojakach przymocowanych do płyty technologicznej. Średnica zewnętrzna słupów wynosi 100 mm i współpracuje z belką poprzeczną wyposażoną w tuleje z łożyskami ślizgowymi, co umożliwia jej ruch przy niewielkich oporach.



**Rys. 7.2** Układ wodząco–prowadzący umożliwiający montaż przedniego zawieszenia motocykla

Do górnej części belki poprzecznej zamocowano zespół montażowy przedniego widelca motocykla. W konstrukcji stanowiska wykorzystano również element łączący wzbudnik pulsatora z płytą montażową przedniego zawieszenia pojazdu. Płyta ta została połączona z belką poprzeczną za pomocą czterech śrub, co umożliwia bezpośrednie przekazywanie wymuszeń z pulsatora na przednie zawieszenie. Tak zaprojektowana płyta wraz z zespołem łożysk umożliwia montaż przednich zawiesznień motocykli w zakresie rozstawu od 150 mm do 450 mm. W celu umożliwienia montażu pojazdów o zróżnicowanym rozstawie zawieszenia, na całej długości płyty wykonano rowki teowe, pozwalające na przesuw zespołów łożysk. Dla każdego motocykla przed montażem na stanowisku konieczne jest wykonanie indywidualnych wałków montowanych w pierścieniu wewnętrznym łożyska oraz w elemencie zawieszenia.

Zadaniem pierwszego z pulsatorów elektrohydraulicznych jest realizacja wymuszenia ruchu belki poprzecznej układu wodząco-prowadzącego, do której przymocowany został widelec pojazdu jednośladowego. Pulsator został na stałe przykręcony do płyty technologicznej spoczywającej na elementach gumowych, pełniącej funkcję podstawy stanowiska. Wzbudnik wyposażono w czujnik przemieszczenia oraz czujnik siły, które umieszczono pomiędzy belką układu wodząco-prowadzącego, a tłoczyskiem pulsatora. Sygnały z tych czujników są przekazywane do układu sterowania MTS Model FlexTest 60 Controller .

Drugiemu z pulsatorów elektrohydraulicznych przypisano realizację wymuszenia ruchu płyty wraz z zespołem łożysk, do której przymocowany został wahacz pojazdu jednośladowego. Pulsator elektrohydrauliczny wraz z zespołem umożliwiającym montaż wahaczy motocykli został połączony z płytą technologiczną za pomocą przegubu, przedstawionego na rysunku 7.3. Przegub ten zbudowano z dwóch płyt stalowych, zespołu łożyska, wałka oraz dwóch wsporników wałka końcowego. Zastosowanie takiego rozwiązania ma na celu wyeliminowanie lub istotne ograniczenie obciążeń momentowych działających na motocykl podczas prowadzonych badań. Podstawę przegubu zamocowano do płyty technologicznej stanowiącej podstawę istniejącego stanowiska, natomiast druga część przegubu została połączona z podstawą pulsatora elektrohydraulicznego.

W górnej części pulsatora zamocowano płytę wraz z zespołem łożysk umożliwiającą montaż wahaczy motocyklowych w zakresie rozstawu od 100 mm do 450 mm. Podobnie jak w przypadku przedniego zawieszenia, na całej długości płyty wykonano rowki teowe, umożliwiające regulację położenia zespołów łożysk. Dla każdego motocykla przed montażem na stanowisku

badawczym wymagane jest wykonanie specjalnych wałków montowanych w pierścieniu wewnętrznym łożyska oraz w elemencie wahacza.

Wzbudnik wyposażono ponadto w czujnik przemieszczenia oraz siły, umieszczony pomiędzy tłoczyskiem pulsatora, a zespołem montażowym wahacza pojazdu jednośladowego. Sygnały pomiarowe również w tym przypadku są przekazywane do układu sterowania MTS Model FlexTest 60 Controller.



**Rys. 7.3** Pulsator elektrohydrauliczny wraz z przegubem i płytą umożliwiającą montaż wahaczy motocyklowych

W tabeli 7.1 zestawiono najważniejsze parametry techniczne pulsatorów elektrohydraulicznych MTS Model 244.12. Przedstawione dane, obejmujące m.in. maksymalną siłę, skok tłoczyska oraz częstotliwość pracy, są w pełni wystarczające do prowadzenia symulacyjnych badań wibracyjnych

motocykli, zarówno w kontekście analizy komfortu, jak i bezpieczeństwa użytkownika.

**Tabela 7.1.** Dane techniczne pulsatorów elektrohydraulicznych MTS Model 244.12.

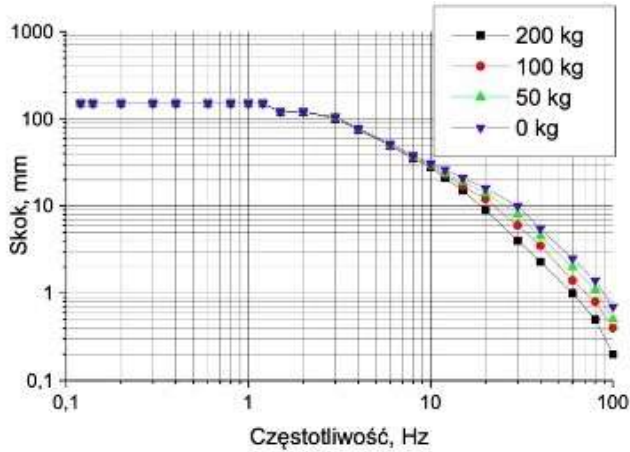
<b>Siła maksymalna</b>	25 kN
<b>Skok tłoczyska</b>	152 mm oraz 254 mm
<b>Częstotliwość ruchów</b>	100 Hz
<b>Temperatura pracy</b>	5 – 50 °C

Zespół hydraulicznego rozdzielacza, umieszczony pomiędzy urządzeniem zasilania hydraulicznego, a serwozaworami pulsatorów elektrohydraulicznych, umożliwi operatorowi niezależne uruchamianie poszczególnych obwodów hydraulicznych. Rozdzielacz, przedstawiony na rysunku 7.4, pełni również funkcję zabezpieczającą każdy z obwodów przed niekontrolowanym ruchem siłownika, który mógłby doprowadzić do uszkodzenia badanego pojazdu lub jego elementów. Zastosowane akumulatory ciśnieniowe umożliwiają magazynowanie energii hydraulicznej w celu zwiększenia wydajności układu, a jednocześnie pozwalają ograniczyć zapotrzebowanie na większy zespół zasilania hydraulicznego. Utrzymywanie odpowiedniego ciśnienia w przewodach zasilających i powrotnych zwiększa niezawodność działania układu oraz ogranicza wahania ciśnienia, co skutkuje również zmniejszeniem ruchów przewodów hydraulicznych podczas pracy siłowników.

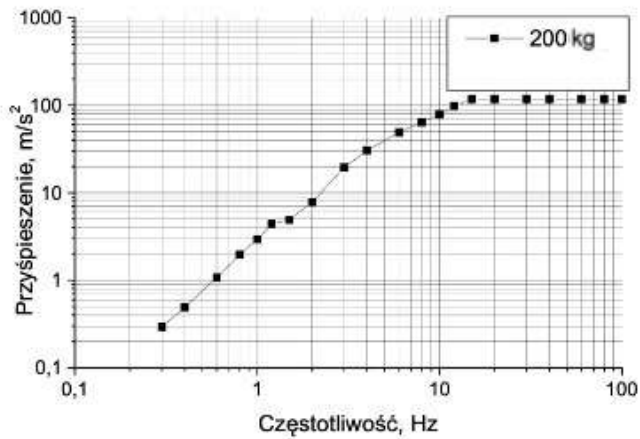


**Rys. 7.4** Rozdzielacz hydrauliczny

System składający się z pulsatora, zasilacza, serwozaworu i sterownika umożliwia pracę wzbudników w zakresach przedstawionych na rysunku 7.5. Zaprezentowane charakterystyki zewnętrzne, obejmujące zależności skoku i przyspieszenia od częstotliwości, potwierdzają, że zakres pracy stanowiska jest w pełni wystarczający do prowadzenia symulacyjnych badań motocykli, zarówno w zakresie identyfikacji parametrów modeli dynamicznych, jak i różnorodnych analiz związanych z komfortem oraz bezpieczeństwem.



a)



b)

**Rys. 7.5** Zewnętrzna charakterystyka pulsatorów  
a) skok – częstotliwość, b) przyspieszenie – częstotliwość

Zespół zasilania hydraulicznego odpowiada za dostarczanie oleju hydraulicznego do rozdzielacza pod określonym ciśnieniem, skąd medium robocze trafia do pulsatorów elektrohydraulicznych. Sterowanie zespołem zasilania może być realizowane lokalnie za pomocą panelu kontrolno-sterowniczego lub zdalnie z wykorzystaniem sterownika. Układ zasilania MTS Model Silent Flow 505.20, przedstawiony na rysunku 7.6, jest

chłodzony wodą, przy czym zapotrzebowanie wymiennika ciepła na wodę wynosi przykładowo 42,7 l/min przy temperaturze otoczenia 26,7 °C.



**Rys. 7.6** Zespół zasilania hydraulicznego Model Silent flow 505.20.

Podstawowe parametry techniczne zespołu zasilania hydraulicznego zestawiono w tabeli 7.2. Parametry te, obejmujące m.in. ciśnienie robocze, wydajność układu, pobór mocy oraz poziom hałasu, zapewniają prawidłowe i bezpieczne funkcjonowanie stanowiska badawczego przeznaczonego do badań motocykli.

**Tabela 7.2** Parametry techniczne zespołu zasilania hydraulicznego Model Silent flow 505.20.

<b>Ciśnienie układu zasilania</b>	21 MPa
<b>Wydajność układu zasilania</b>	63 l/min
<b>Pobór mocy</b>	30 kW
<b>Napięcie zasilające</b>	200 – 575 V AC
<b>Pojemność zbiornika oleju hydraulicznego</b>	341 l
<b>Masa układu z olejem hydraulicznym</b>	817 kg
<b>Wymiary zewnętrzne wys. x szer. x dl.</b>	137 x 86,4 x 156,5 cm
<b>Temperatura pracy</b>	5 do 40 °C
<b>Hałas mierzony w odległości 1 m</b>	63 dB(A)

Układ kontrolno-sterujący, przedstawiony na rysunku 7.7, oparty na oprogramowaniu MTS Series 793 Control Software, zapewnia pełne sterowanie całym systemem badawczym. Sterowanie realizowane jest z wykorzystaniem jednostki sterującej oraz dedykowanego oprogramowania wyposażonego w graficzny interfejs użytkownika, umożliwiający szybką konfigurację systemu dla szerokiego zakresu aplikacji testowych. Wielokanałowy układ sterowania pulsatorami umożliwia generowanie przebiegów sinusoidalnych, prostokątnych i trójkątnych w zakresie częstotliwości od 0,001 Hz do 600 Hz, a także sygnałów narastających, losowych oraz sinusoidalnych o zmiennej częstotliwości. Podczas trwania testu operator ma możliwość bieżącego monitorowania parametrów pracy systemu, w tym wskazań mierników cyfrowych oraz przebiegów prezentowanych na wirtualnym oscyloskopie. Informacje te są zgodne z charakterystyką systemu Series 793, który łączy środowisko projektowania testu z możliwościami sterowania serwohydraulicznego i rejestracji danych w zastosowaniach dynamicznych i wieloosiowych.



Rys. 7.7 Stanowisko kontrolno-sterownicze z oprogramowaniem firmy MTS Series 793 Control Software oraz Moog Replication

Stanowisko badawcze zostało ponadto wyposażone w dodatkowe oprogramowanie Moog Replication Software Module, które stanowi istotny element realizacji badań odtwarzających rzeczywiste wymuszenia drogowe. Moduł ten umożliwia wierne odzwierciedlenie na stanowisku laboratoryjnym drgań uprzednio zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych poprzez wykorzystanie plików czasowych typu time history drive files. W niniejszych badaniach zarejestrowane sygnały drogowe były przekazywane do dwóch pulsatorów elektrohydraulicznych, co pozwalało na jednoczesne odwzorowanie wymuszeń działających na przednie i tylne zawieszenie motocykla.

Z punktu widzenia funkcjonalnego Moog Replication Software Module wykorzystuje algorytmy przeznaczone do dokładnej replikacji sygnałów czasowych w układach badawczych, umożliwiając prowadzenie testów w warunkach laboratoryjnych z dużą zgodnością względem rzeczywistych przejazdów drogowych. Oprogramowanie to wchodzi w skład zintegrowanego środowiska Moog Integrated Test Suite, które zapewnia modułową architekturę, obsługę różnych systemów testowych oraz możliwość centralnego zarządzania testami i danymi pomiarowymi. Producent podkreśla, że moduł Replication jest przeznaczony do łatwego, a zarazem zaawansowanego odtwarzania przebiegów czasowych oraz wspiera dokładną replikację sygnałów przy wykorzystaniu zoptymalizowanych algorytmów sterowania.

Zastosowanie modułu Moog Replication w stanowisku badawczym zwiększyło realizm prowadzonych eksperymentów, ponieważ umożliwiło odtworzenie na stanowisku sygnałów wymuszeń zarejestrowanych wcześniej na odcinkach drogowych. Według materiałów producenta takie podejście pozwala ograniczyć liczbę kosztownych badań terenowych, zwiększyć powtarzalność eksperymentów oraz przyspieszyć proces testowania i walidacji rozwiązań konstrukcyjnych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. W kontekście niniejszej pracy miało to kluczowe znaczenie dla porównania wyników badań drogowych, stanowiskowych oraz symulacyjnych.

Opracowane stanowisko wyróżnia się unikalną konstrukcją, umożliwiającą wierne odwzorowanie rzeczywistych wymuszeń działających na motocykl podczas jazdy. Zastosowany układ wodząco-prowadzący oraz dedykowane zespoły montażowe pozwalają na instalację zarówno przedniego zawieszenia (widelca), jak i tylnego wahacza motocykla, przy jednoczesnym

zachowaniu odpowiedniej swobody ruchu i minimalizacji dodatkowych obciążeń niepożądanych. Istotną zaletą stanowiska jest również możliwość prowadzenia badań zarówno z wykorzystaniem manekina antropomorficznego, jak i rzeczywistego użytkownika, co znacząco zwiększa wiarygodność uzyskiwanych wyników.

Kluczowym elementem stanowiska są dwa pulsatory elektrohydrauliczne firmy MTS, odpowiedzialne za generowanie wymuszeń dla przedniego i tylnego zawieszenia motocykla. Ich parametry techniczne, obejmujące maksymalną siłę do 25 kN, skok tłoczyska do 254 mm oraz częstotliwość pracy do 100 Hz, zapewniają możliwość odwzorowania szerokiego zakresu rzeczywistych obciążeń dynamicznych. Zastosowanie przegubowego połączenia w układzie tylnego zawieszenia pozwala na ograniczenie momentów zginających, co przekłada się na większą dokładność odwzorowania warunków eksploatacyjnych.

Uzupełnieniem układu wzbudzającego jest zaawansowany system hydrauliczny, obejmujący zespół zasilania, rozdzielacz oraz układ sterowania. System ten umożliwi stabilną i bezpieczną pracę stanowiska, a także precyzyjne sterowanie parametrami wymuszeń. Szczególnie istotną rolę odgrywa wielokanałowy układ kontrolno-sterujący MTS, który pozwala na generowanie różnorodnych sygnałów wymuszających (sinusoidalnych, losowych, narastających) w szerokim zakresie częstotliwości od 0,001 Hz do 600 Hz oraz bieżące monitorowanie parametrów pracy układu.

Przeprowadzona analiza wykazała, że zaprojektowane stanowisko badawcze spełnia wymagania stawiane nowoczesnym systemom do badań dynamicznych motocykli. Jego parametry techniczne oraz elastyczność konfiguracji umożliwiają realizację zarówno badań eksperymentalnych, jak

i identyfikację parametrów modeli numerycznych oraz analizę wpływu drgań na komfort i bezpieczeństwo motocyklisty. Stanowisko to stanowi zatem kluczowe narzędzie badawcze w dalszych etapach pracy, umożliwiające weryfikację modeli symulacyjnych oraz ocenę skuteczności proponowanych rozwiązań redukcji drgań.



## **8. Odwzorowanie drgań zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych na stanowisku badawczym**

W niniejszym rozdziale przedstawiono procedurę odwzorowania drgań pochodzących z sześciu różnych rodzajów nawierzchni drogowych, na których przeprowadzono pomiary w warunkach rzeczywistych. Zarejestrowane sygnały, uzyskane podczas jazdy motocyklem po nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym, asfalcie o złym stanie technicznym, kostce brukowej, prefabrykowanych płytach betonowych, a także podczas pokonywania progu podrzutowego oraz listwowego progu zwalniającego, zostały poddane wstępnej obróbce, a następnie zaimplementowane do systemu sterowania stanowiska badawczego wyposażonego w pulsatory elektrohydrauliczne.

Celem podjętych działań było możliwie wierne odwzorowanie amplitud, zakresów częstotliwości oraz charakterystycznych impulsów dynamicznych występujących w rzeczywistych warunkach jazdy. W rozdziale szczegółowo opisano, po ilu kolejnych implementacjach – określanych dalej jako iteracje procesu uczenia systemu sterującego – uzyskano stabilny i powtarzalny poziom zbieżności pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałem generowanym w warunkach laboratoryjnych. W trakcie kolejnych iteracji wyznaczano również wartości błędów procentowych, umożliwiającących obiektywną ocenę postępu procesu kalibracji.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano zestawienia ilustrujące zmiany różnic pomiędzy referencyjnymi przebiegami drgań a przebiegami uzyskiwanymi na stanowisku badawczym w kolejnych iteracjach. Wykazano, że zastosowanie metod iteracyjnych, w znacznej mierze opartych na

algorytmach automatycznej korekcji sygnału, pozwoliło na obniżenie błędów odwzorowania do poziomu uznawanego za akceptowalny (poniżej kilku procent). Osiągnięte rezultaty umożliwiają rzetelne odtwarzanie warunków drogowych w skali laboratoryjnej i stanowią punkt wyjścia do dalszych analiz wpływu modyfikacji konstrukcyjnych motocykla na komfort i bezpieczeństwo kierującego.

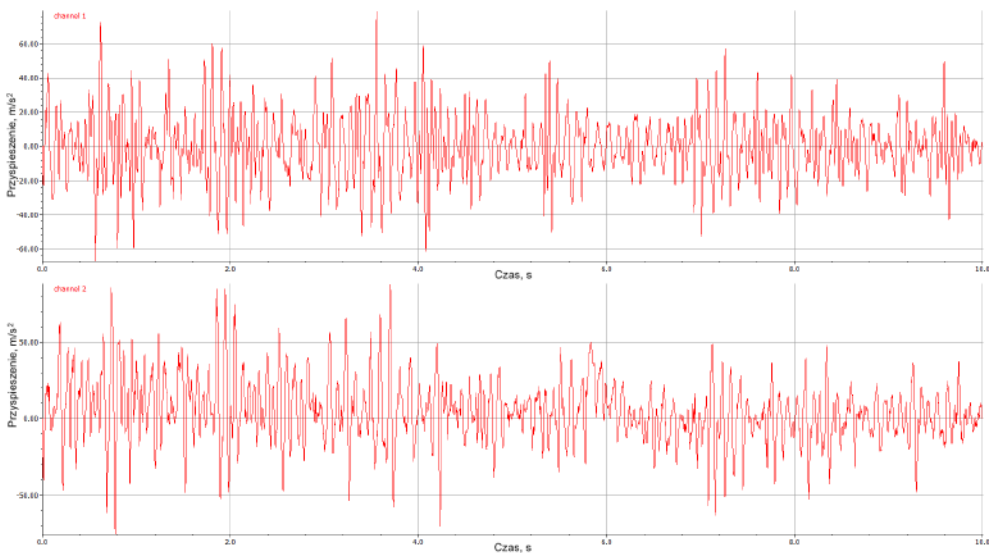
### **8.1. Metodyka odwzorowania drgań**

We wcześniejszym etapie badań przeprowadzono rejestrację sygnałów drgań podczas prób drogowych realizowanych na sześciu różnych rodzajach nawierzchni. Uzyskane w ten sposób sygnały zostały następnie wykorzystane jako sygnały wzorcowe w procesie replikacji realizowanym na stanowisku badawczym. Podstawowym celem zastosowanej metodyki było osiągnięcie możliwie najwyższego stopnia zbieżności pomiędzy przebiegami zarejestrowanymi w warunkach rzeczywistych, a przebiegami generowanymi w laboratorium.

Kluczowym elementem algorytmu replikacji jest iteracyjne dopasowanie sygnału wyjściowego, generowanego przez siłowniki elektrohydrauliczne, do sygnału wzorcowego. Każda kolejna iteracja procesu ma na celu minimalizację różnic pomiędzy sygnałem zadany, a aktualnie uzyskiwanym. Zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego w układzie sterowania umożliwia skuteczną kompensację błędów wynikających zarówno z ograniczeń dynamicznych układu wykonawczego, jak i z nieliniowości konstrukcji motocykla zamontowanego na stanowisku.

Proces wgrywania i odtwarzania przebiegów amplitud przyspieszeń drgań zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych realizowano

z wykorzystaniem oprogramowania Moog Replication. Procedura ta obejmowała kilka etapów, których celem było uzyskanie wiernej symulacji drgań motocykla w warunkach laboratoryjnych. W pierwszym etapie przygotowano sygnały odpowiadające osi przedniej i tylnej motocykla. Zgromadzone dane poddano wstępnej obróbce, obejmującej filtrację szumów oraz synchronizację czasową kanałów pomiarowych. Przykładowe przebiegi zarejestrowane dla nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h zaprezentowano na rysunku 8.1.



**Rys. 8.1** Przykładowe czasowe przebiegi przyspieszeń drgań zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla podczas jazdy po drodze o złym stanie technicznym

Przedstawione na rysunku 8.1 przebiegi czasowe przyspieszeń charakteryzują się dużą nieregularnością oraz obecnością licznych impulsów o znacznej amplitudzie. Taki charakter sygnału jest typowy dla jazdy po

nawierzchni o znacznych nierównościach, gdzie występują zarówno drgania ciągłe, jak i krótkotrwałe wstrząsy o charakterze losowym.

Widoczne wartości szczytowe, przekraczające lokalnie  $\pm 50$  m/s<sup>2</sup>, wskazują na intensywne obciążenia dynamiczne działające na motocykl, które mogą mieć istotny wpływ na komfort i bezpieczeństwo motocyklisty. Różnice w strukturze sygnałów pomiędzy kanałem 1 i kanałem 2 świadczą o odmiennym charakterze przenoszenia drgań przez oś przednią i tylną pojazdu, co uzasadnia ich niezależną analizę oraz osobne odwzorowanie w procesie replikacji na stanowisku badawczym.

W kolejnym etapie wyznaczono podstawowe charakterystyki statystyczne wgranych sygnałów, takie jak wartość skuteczna (RMS), wariancja, wartości minimalne i maksymalne oraz parametry opisujące kształt rozkładu. Uzyskane informacje pozwoliły na ocenę skali i charakteru zarejestrowanych wibracji. Przykładowo, wysoka wartość RMS wskazuje na regularnie występujące wstrząsy o znacznej intensywności, natomiast duża rozpiętość pomiędzy wartościami ekstremalnymi może świadczyć o obecności krótkotrwałych, impulsowych uderzeń, charakterystycznych np. dla przejazdów przez progi podrzutowe. Dane statystyczne stanowiły punkt odniesienia dla późniejszej oceny dokładności odwzorowania drgań na stanowisku badawczym. W tabeli 8.1 przedstawiono wyniki dla drogi z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym.

**Tabela 8.1** Statystyczne parametry przyspieszeń drgań zarejestrowanych na osi przedniej tylnej motocykla, przetworzone w oprogramowaniu Moog Replication

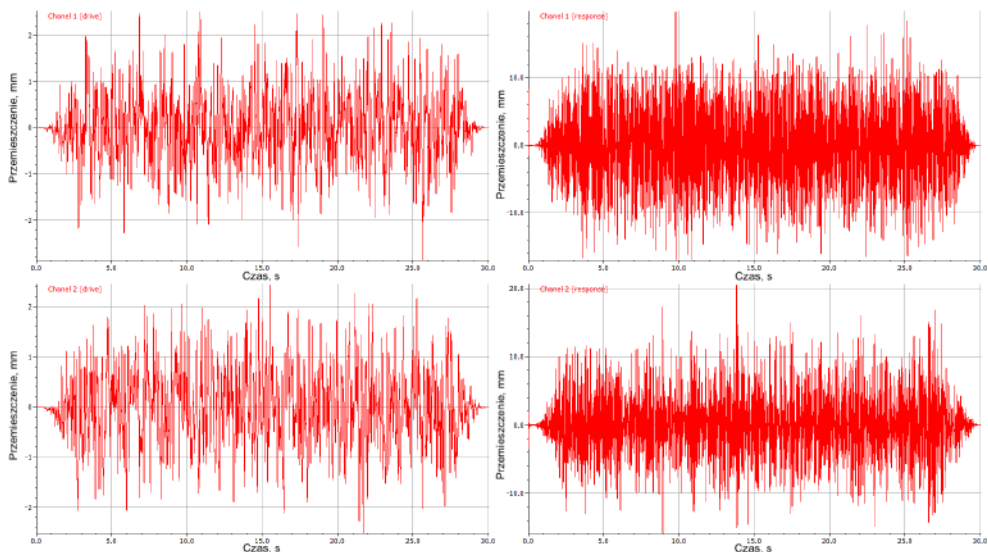
Kanał	Wartość minimalna [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość maksymalna [m/s <sup>2</sup> ]	Rozstęp [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość średnia [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość skuteczna RMS [m/s <sup>2</sup> ]
1 – oś przednia	-67.3813	78.6167	145.998	0.00390534	18.4083
2 – oś tylna	-75.7114	87.414	163.125	5.15997	21.3717
Kanał	Odchylenie standardowe [m/s <sup>2</sup> ]	Wariancja [m <sup>2</sup> /s <sup>4</sup> ]	Skośność [-]	Kurtoza [-]	-
1 – oś przednia	18.4129	339.035	0.158186	3.91625	-
2 – oś tylna	20.7447	430.341	0.268454	4.33909	-

W tabeli zestawiono podstawowe parametry statystyczne sygnałów przyspieszeń drgań zarejestrowanych na osi przedniej i tylnej motocykla podczas jazdy po nawierzchni o znacznych nierównościach. Przedstawione wartości minimalne i maksymalne wskazują na bardzo szeroki zakres amplitud przyspieszeń, sięgający lokalnie powyżej  $\pm 80$  m/s<sup>2</sup>, co potwierdza występowanie intensywnych obciążeń dynamicznych o charakterze impulsowym.

Zauważalnie wyższe wartości skuteczne RMS oraz wariancji dla osi tylnej świadczą o większej intensywności drgań przenoszonych przez tylną część motocykla, co może wynikać z charakterystyki pracy tylnego zawieszenia oraz interakcji koła z nierówną nawierzchnią. Jednocześnie podwyższone wartości kurtozy, szczególnie dla osi tylnej, potwierdzają obecność krótkotrwałych, gwałtownych impulsów, które nie są w pełni opisywane przez klasyczną wartość RMS.

Kolejnym krokiem była weryfikacja zgodności sygnału zadanego na pulsatory elektrohydrauliczne z sygnałem rzeczywiście uzyskanym w warunkach laboratoryjnych. Po przygotowaniu i zaimplementowaniu

profilu wymuszenia w programie Moog Replication uruchamiano test, w trakcie którego siłowniki w kontrolowany sposób odtwarzały amplitudy i częstotliwości zapisane w sygnale wzorcowym. Jednocześnie na stanowisku badawczym ponownie rejestrowano przyspieszenia na osi przedniej i tylnej motocykla. Kanał pierwszy odpowiadał osi przedniej zamocowanej do pierwszego pulsatora, natomiast kanał drugi osi tylnej zamocowanej do drugiego pulsatora. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz ocenę stopnia pokrycia się przebiegów wzorcowych z generowanymi. Przykładowy przebieg sygnałów weryfikacyjnych przedstawiono na rysunku 8.2, gdzie sygnał „drive” odpowiada przemieszczeniom siłowników, a sygnał „response” zarejestrowanym przyspieszeniom.



**Rys. 8.2** Czasowe przebiegi sygnałów sterujących (drive) oraz odpowiadających im odpowiedzi dynamicznych (response) uzyskanych na stanowisku badawczym dla osi przedniej i tylnej motocykla

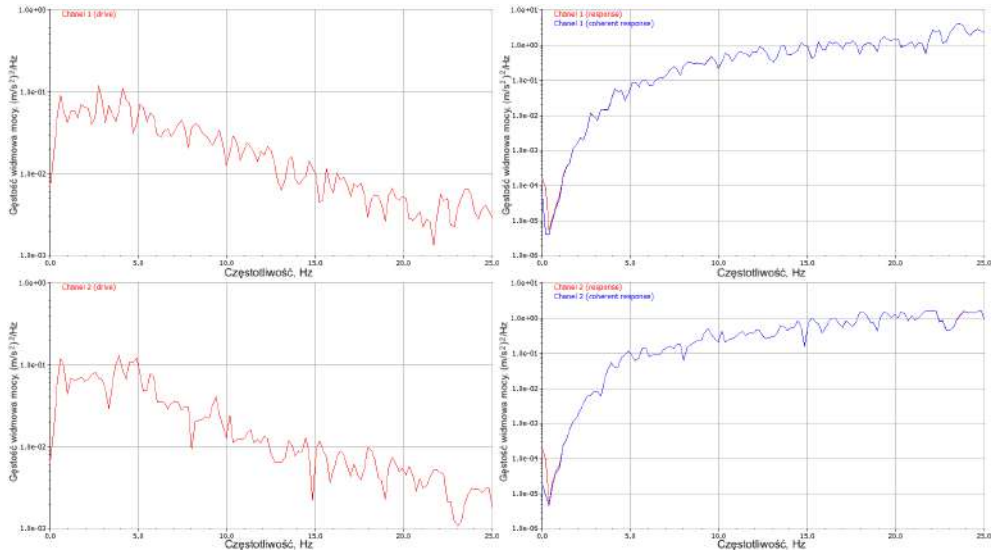
Na rysunku 8.2 przedstawiono porównanie czasowych przebiegów sygnałów sterujących (drive) oraz odpowiadających im odpowiedzi dynamicznych (response) uzyskanych na stanowisku badawczym dla dwóch kanałów pomiarowych. Sygnały drive reprezentują wymuszenia zadane pulsatorom elektrohydraulicznym w procesie replikacji, natomiast sygnały response odzwierciedlają rzeczywiste przyspieszenia drgań zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla.

Widoczna zgodność ogólnego kształtu sygnałów oraz podobieństwo rozkładu amplitud potwierdzają poprawność procesu odwzorowania drgań w dziedzinie czasu. Jednocześnie obserwowane lokalne różnice amplitudowe i fazowe są charakterystyczne dla układów o złożonej dynamice i stanowią podstawę do dalszej iteracyjnej korekcji sygnału sterującego.

Rysunek ten ilustruje kluczowy etap weryfikacji procesu replikacji, pokazując bezpośrednią relację pomiędzy sygnałem zadany a odpowiedzią układu badawczego, co stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz w dziedzinie częstotliwości oraz oceny dokładności odwzorowania.

Istotnym etapem procesu była identyfikacja systemu w środowisku Moog Replication, która pozwoliła na określenie relacji pomiędzy sygnałem sterującym, a odpowiedzią dynamiczną motocykla. W tym celu wykorzystano narzędzia analizy w dziedzinie częstotliwości, obejmujące wyznaczenie gęstości widmowej mocy (PSD), funkcji spójności (coherence) oraz funkcji odpowiedzi częstotliwościowej (FRF). W pierwszej kolejności analizie poddano widmo sygnału sterującego, co umożliwiło identyfikację pasm częstotliwości, w których skupia się największa energia wymuszeń. Następnie przeanalizowano widmo sygnału odpowiedzi, co pozwoliło na ocenę różnic pomiędzy sygnałem zadany a uzyskiwanym oraz identyfikację

potencjalnych rezonansów lub tłumienia w określonych zakresach częstotliwości. Przykładowe wykresy przedstawiono na rysunku 8.3.



**Rys. 8.3** Gęstość widmowa mocy (PSD) sygnałów sterujących oraz porównanie odpowiedzi dynamicznej i odpowiedzi koherentnej układu dla kanałów 1 i 2

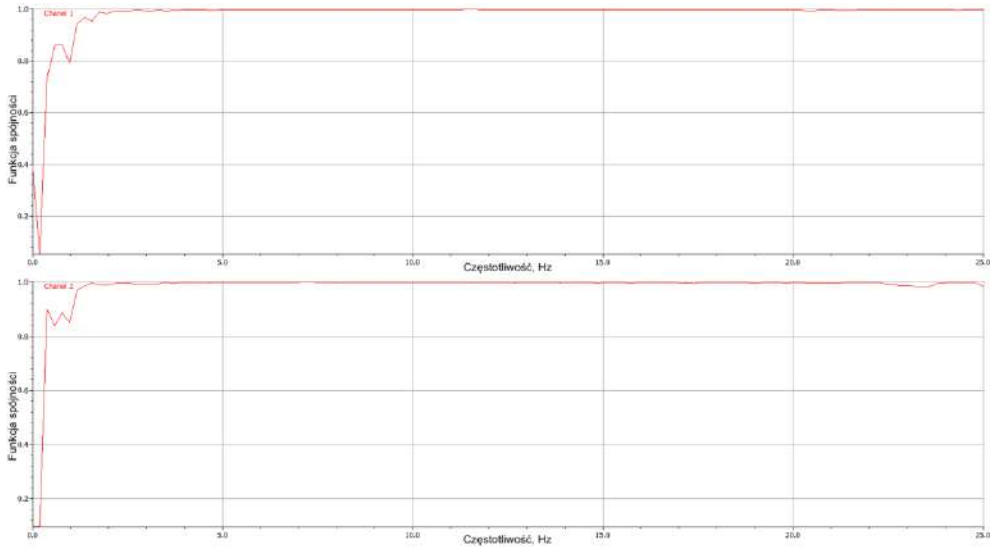
Na rysunku 8.3 przedstawiono gęstość widmową mocy sygnałów sterujących oraz porównanie gęstości widmowej mocy odpowiedzi dynamicznej i odpowiedzi koherentnej układu dla dwóch kanałów pomiarowych. Analiza w dziedzinie częstotliwości umożliwia ocenę rozkładu energii drgań w poszczególnych pasmach oraz identyfikację zakresów, w których proces replikacji charakteryzuje się najwyższą skutecznością.

Widma sygnałów sterujących wykazują dominację niskich częstotliwości, z wyraźnym spadkiem gęstości widmowej mocy wraz ze wzrostem częstotliwości, co jest charakterystyczne dla wymuszeń pochodzących od nierówności nawierzchni. Porównanie widm odpowiedzi

rzeczywistej i koherentnej wskazuje na dobrą zgodność w szerokim zakresie częstotliwości, szczególnie poniżej około 20 Hz, co potwierdza poprawne odwzorowanie kluczowych składowych drgań.

Lokalne różnice pomiędzy przebiegami mogą wynikać z nieliniowości układu zawieszenia motocykla, ograniczeń dynamicznych pulsatorów elektrohydraulicznych oraz tłumienia wprowadzanego przez elementy konstrukcyjne stanowiska badawczego. Wyniki te stanowią istotną podstawę do dalszej analizy funkcji spójności oraz charakterystyk odpowiedzi częstotliwościowej FRF.

Ocena funkcji spójności umożliwiła określenie stopnia korelacji pomiędzy sygnałem wejściowym a wyjściowym w funkcji częstotliwości. Wysokie wartości spójności, zbliżone do jedności, świadczą o dobrej jakości odwzorowania i prawidłowym przenoszeniu drgań przez układ badawczy. Obniżenie wartości spójności w określonych pasmach może natomiast wskazywać na obecność nieliniowości układu lub ograniczeń konstrukcyjnych stanowiska. Wykresy funkcji spójności dla osi przedniej i tylnej przedstawiono na rysunku 8.4.



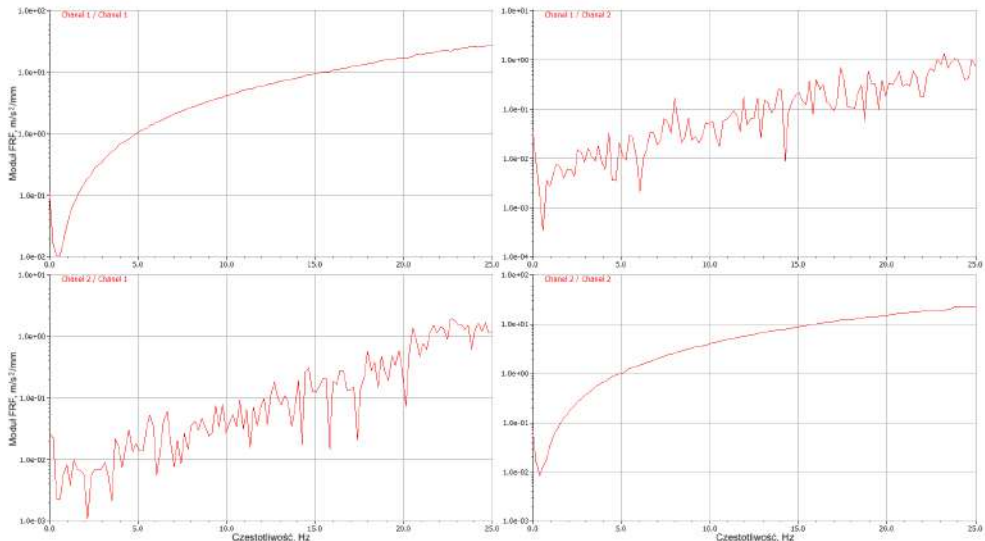
**Rys. 8.4** Wartość funkcji spójności między sygnałem sterującym a odpowiedzią układu w poszczególnych pasmach częstotliwości dla osi przedniej i tylnej motocykla

Na rysunku 8.4 przedstawiono wartości funkcji spójności pomiędzy sygnałem sterującym a odpowiedzią dynamiczną układu w funkcji częstotliwości dla osi przedniej i tylnej motocykla. Wysokie wartości spójności, utrzymujące się w szerokim zakresie częstotliwości i zbliżone do jedności, świadczą o silnej korelacji pomiędzy sygnałami oraz o wysokiej jakości procesu odwzorowania drgań na stanowisku badawczym.

Sz szczególnie dobra zgodność obserwowana jest w paśmie od 2 do 20 Hz, która ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty. Niewielkie lokalne obniżenia wartości spójności w najniższych częstotliwościach mogą wynikać z ograniczeń dynamicznych układu wykonawczego, nieliniowości zawieszenia lub wpływu szumów pomiarowych.

Uzyskane charakterystyki spójności potwierdzają, że zarówno dla osi przedniej, jak i tylnej motocykla proces iteracyjnej replikacji zapewnia wiarygodne odwzorowanie rzeczywistych drgań w istotnym zakresie częstotliwości.

Dodatkowo wykorzystano analizę funkcji odpowiedzi częstotliwościowej FRF, wyznaczanej jako iloraz widma sygnału wyjściowego do widma sygnału wejściowego. Analiza FRF umożliwia ocenę, w jakim stopniu układ wzmacnia lub tłumi poszczególne składowe częstotliwościowe oraz jakie opóźnienia wprowadza. Wyniki tej analizy pozwalają na identyfikację częstotliwości rezonansowych oraz zakresów skutecznego tłumienia drgań przez układ zawieszenia. Przykładowe charakterystyki FRF dla osi przedniej i tylnej przedstawiono na rysunku 8.5.



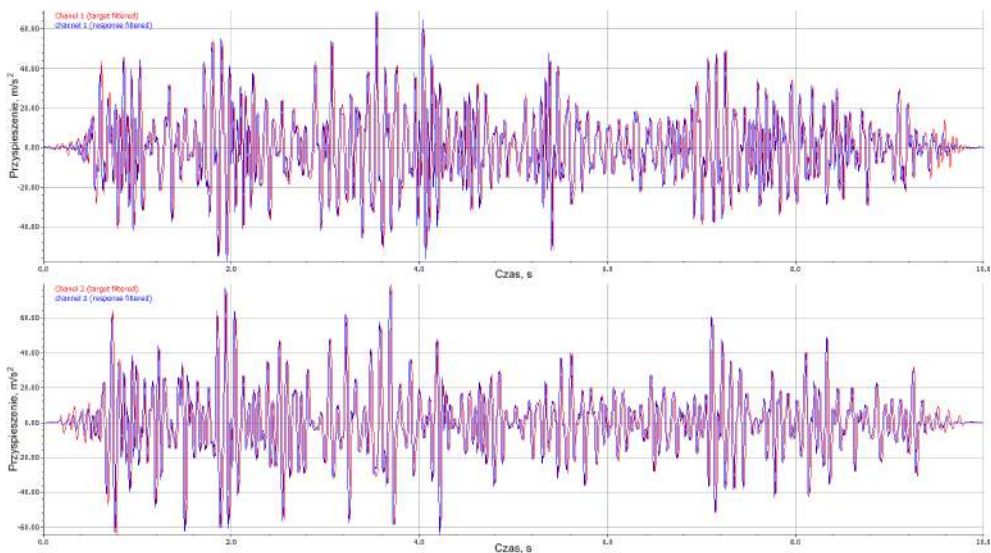
**Rys. 8.5** Amplitudowe charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej (FRF) pomiędzy kanałami wejściowymi i wyjściowymi dla osi przedniej i tylnej motocykla

Na rysunku 8.5 przedstawiono amplitudowe charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej pomiędzy kanałami wejściowymi i wyjściowymi dla osi przedniej i tylnej motocykla. Analiza funkcji FRF umożliwia ocenę sposobu przenoszenia drgań w układzie zawieszenia oraz identyfikację zakresów częstotliwości, w których występuje wzmocnienie lub tłumienie sygnału [98].

Charakterystyki bezpośrednie (Kanał 1/ Kanał 1 oraz Kanał 2/ Kanał 2) wykazują monotoniczny wzrost modułu funkcji FRF wraz ze wzrostem częstotliwości, co jest typowe dla układów o właściwościach inercyjno-sprężystych. Natomiast charakterystyki krzyżowe (Kanał 1/ Kanał 2 oraz Kanał 2/ Kanał 1) wskazują na obecność sprzężeń dynamicznych pomiędzy osiami, których intensywność rośnie w wyższych pasmach częstotliwości.

## **8.2. Iteracja systemu w oprogramowaniu Moog Replication**

Celem procesu iteracji w oprogramowaniu Moog Replication było stopniowe dopasowanie sygnału sterującego do przebiegu wzorcowego aż do uzyskania satysfakcjonującej zbieżności. W rozdziale szczegółowo przedstawiono proces iteracyjny dla drogi asfaltowej o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h, przy czym analogiczną procedurę zastosowano również dla pozostałych nawierzchni. Porównanie sygnału docelowego i początkowego sygnału sterującego umożliwiło identyfikację rozbieżności amplitudowych i fazowych, wynikających z nieznaności pełnej charakterystyki dynamicznej układu [99]. Przykładowe porównanie po ostatniej iteracji przedstawiono na rysunku 8.6.



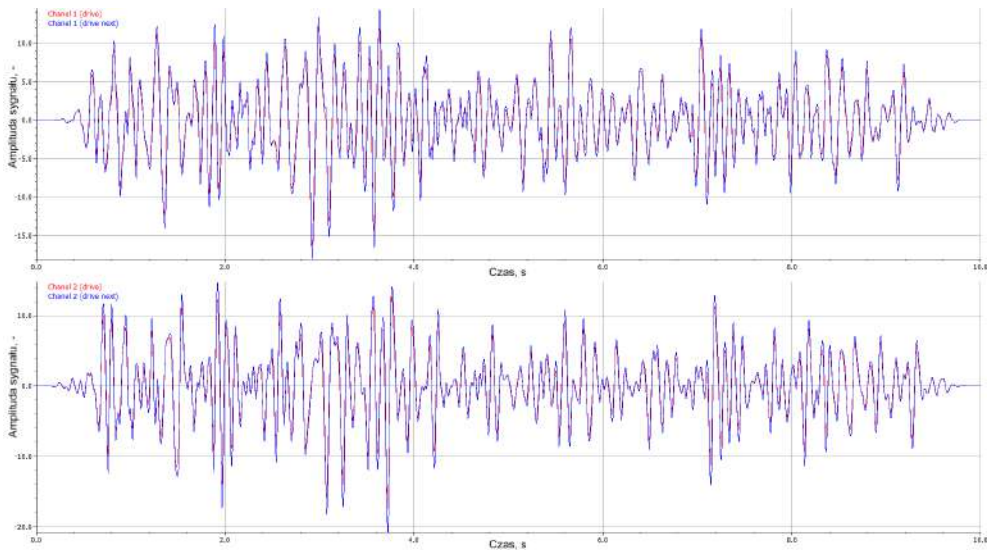
**Rys. 8.6** Porównanie sygnału docelowego i sygnału uzyskanego dla drogi o złym stanie technicznym w ostatniej iteracji procesu replikacji

Na rysunku 8.6 przedstawiono porównanie przefiltrowanych przebiegów czasowych sygnału docelowego oraz sygnału uzyskanego na stanowisku badawczym dla drogi o złym stanie technicznym w ostatniej iteracji procesu replikacji. Widoczna bardzo dobra zgodność kształtu sygnałów, zarówno pod względem amplitudy, jak i fazy, potwierdza skuteczność zastosowanego algorytmu iteracyjnej korekcji sygnału sterującego.

Dla obu kanałów pomiarowych obserwuje się niemal pełne pokrycie przebiegów, co świadczy o wysokiej jakości odwzorowania rzeczywistych drgań w dziedzinie czasu. Niewielkie lokalne różnice amplitudowe mogą wynikać z nieliniowości układu zawieszenia, ograniczeń dynamicznych pulsatorów elektrohydraulicznych lub wpływu szumów pomiarowych.

Uzyskane rezultaty potwierdzają, że w ostatniej iteracji procesu replikacji osiągnięto poziom zgodności sygnałów umożliwiający dalszą analizę w dziedzinie częstotliwości oraz ocenę komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty w warunkach laboratoryjnych.

W kolejnych krokach analizowano zmiany sygnału sterującego w trakcie iteracji. Oprogramowanie Moog Replication automatycznie korygowało sygnał w odpowiedzi na różnice pomiędzy sygnałem docelowym, a odpowiedzią układu, generując sekwencję coraz lepiej dopasowanych przebiegów. Porównanie sygnału sterującego i jego modyfikacji dla ostatniej iteracji zaprezentowano na rysunku 8.7.



**Rys. 8.7** Porównanie sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci w kolejnych iteracjach procesu replikacji dla dwóch kanałów pomiarowych

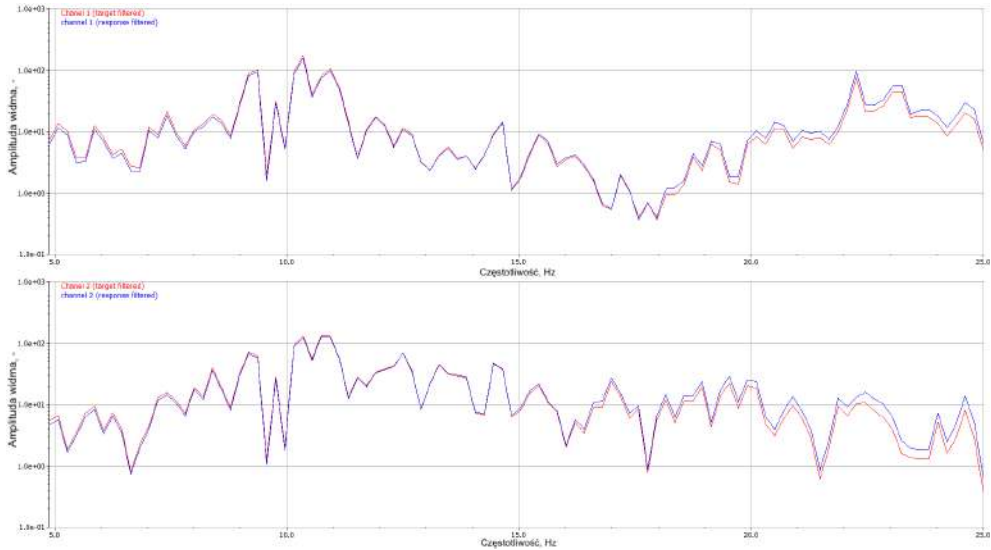
Na rysunku 8.7 przedstawiono porównanie czasowych przebiegów sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci, wygenerowanej

w wyniku iteracyjnej korekcji w procesie replikacji drgań. Wykresy zaprezentowano osobno dla dwóch kanałów pomiarowych, co umożliwia ocenę niezależnych zmian w sygnałach sterujących przypisanych do osi przedniej i tylnej motocykla.

Widoczne różnice pomiędzy przebiegami mają charakter lokalny i dotyczą głównie amplitudy oraz kształtu impulsów w wybranych fragmentach sygnału. Świadczy to o tym, że algorytm iteracyjny wprowadza korekty wyłącznie tam, gdzie różnice pomiędzy sygnałem docelowym, a odpowiedzią układu były istotne.

Stopniowe zmniejszanie zakresu modyfikacji sygnału sterującego w kolejnych iteracjach wskazuje na zbieżność procesu replikacji oraz na osiągnięcie coraz lepszego dopasowania pomiędzy sygnałem zadany, a odpowiedzią dynamiczną układu badawczego.

Analogicznie prowadzono analizę w dziedzinie częstotliwości, porównując widma sygnału docelowego z widmami sygnału uzyskanego na stanowisku, co pozwalało ocenić poprawność odwzorowania w poszczególnych pasmach częstotliwości. Dodatkowo analizowano zmiany widma sygnału sterującego w trakcie iteracji, co ilustruje rysunek 8.9. Wykorzystano również wykresy rozproszenia, umożliwiające wizualną ocenę odległości pomiędzy punktowymi wartościami przyspieszeń sygnału wzorcowego i odpowiedzi układu. Przykładowe wykresy rozproszenia przedstawiono na rysunku 8.10.



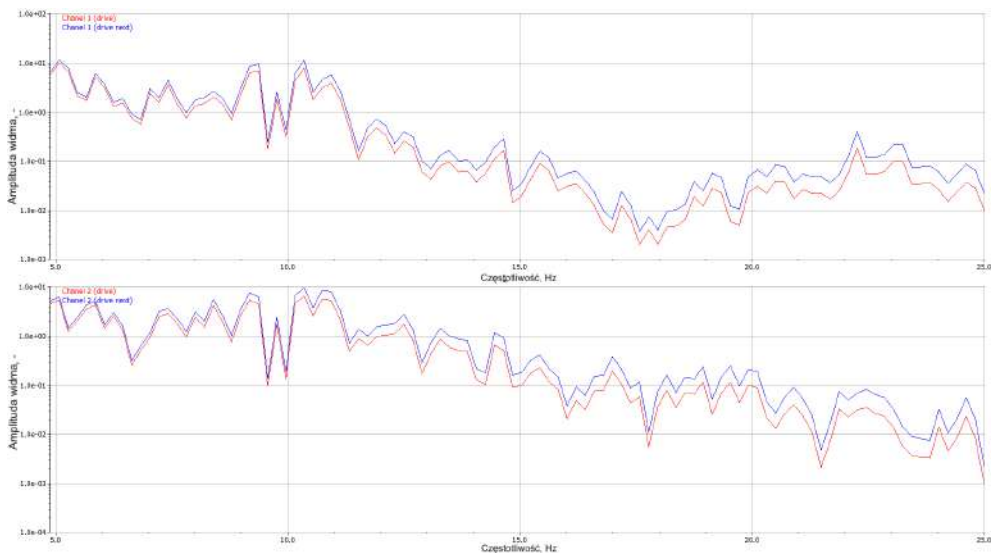
**Rys. 8.8** Porównanie widm częstotliwościowych przefiltrowanego sygnału docelowego oraz przefiltrowanego sygnału uzyskanego na stanowisku badawczym

Na rysunku 8.8 przedstawiono porównanie widm częstotliwościowych przefiltrowanych sygnałów docelowych oraz sygnałów uzyskanych na stanowisku badawczym dla dwóch kanałów pomiarowych. Analiza widmowa umożliwia ocenę stopnia zgodności rozkładu energii drgań w poszczególnych pasmach częstotliwości oraz identyfikację ewentualnych różnic pomiędzy sygnałem wzorcowym a odpowiedzią układu.

Dla obu kanałów obserwuje się bardzo dobrą zgodność kształtu widm w całym analizowanym zakresie częstotliwości, co potwierdza skuteczność procesu iteracyjnej replikacji drgań. Niewielkie lokalne rozbieżności amplitudowe występują głównie w wąskich pasmach i mogą wynikać z nieliniowości układu zawieszenia, ograniczeń dynamicznych pulsatorów elektrohydraulicznych lub wpływu filtracji sygnałów.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że proces odwzorowania zachowuje istotne cechy częstotliwościowe drgań rzeczywistych, co stanowi podstawę do dalszej oceny komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty w warunkach laboratoryjnych.

Analogicznie pokazany jest wykres przedstawiający widma sygnału sterującego oraz widmo sygnału jego modyfikacji, co obrazuje, jak zmienia się energia drgań w poszczególnych pasmach w trakcie procesu dopasowania. Wykres przedstawiający widma sygnału sterującego z widmem sygnału jego modyfikacji dla drogi o złym stanie technicznym po siódmej iteracji został przedstawiony na rysunku 8.9.



**Rys. 8.9** Porównanie widm częstotliwościowych sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci w kolejnych iteracjach procesu replikacji

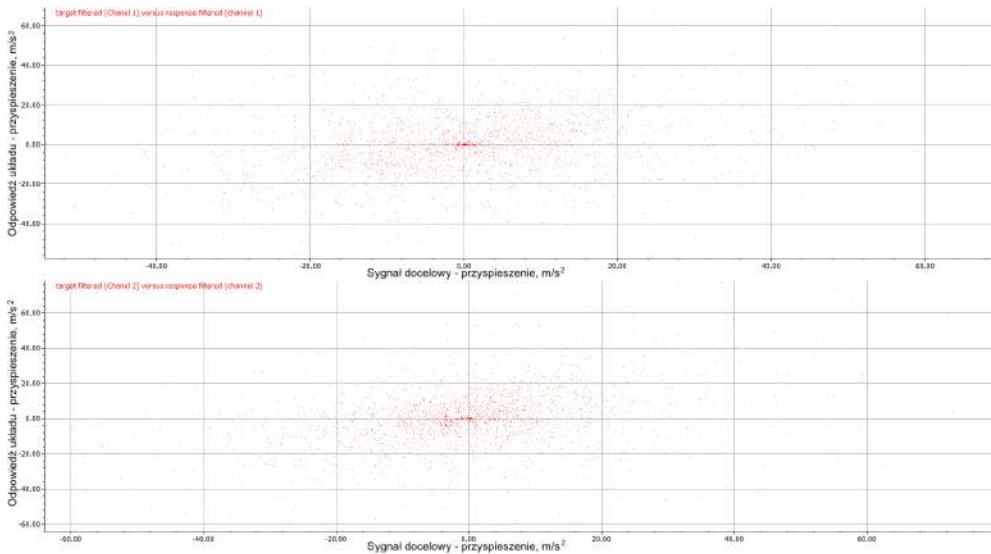
Na rysunku 8.9 przedstawiono porównanie widm częstotliwościowych sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci,

uzyskanej w wyniku iteracyjnej korekcji w procesie replikacji drgań. Analiza widmowa umożliwia ocenę, w jakich pasmach częstotliwości algorytm korekcji wprowadza największe zmiany w sygnale sterującym.

Dla obu kanałów pomiarowych obserwuje się, że modyfikacje widma mają charakter lokalny i dotyczą głównie pasm, w których wcześniej występowały największe rozbieżności pomiędzy sygnałem docelowym, a odpowiedzią układu. W pozostałych zakresach częstotliwości różnice pomiędzy widmami są niewielkie, co świadczy o stopniowej stabilizacji procesu iteracyjnego.

Przedstawione wyniki potwierdzają, że algorytm replikacji działa selektywnie, wprowadzając korekty jedynie tam, gdzie jest to uzasadnione z punktu widzenia poprawy zgodności odwzorowania drgań, co sprzyja zbieżności procesu i ogranicza ryzyko przesterowania układu wykonawczego.

Istotne znaczenie ma również wykres rozproszenia odpowiedzi na tle sygnału docelowego. Pozwala on zwizualizować, jak blisko (bądź daleko) znajdują się punktowe wartości przyspieszeń od wartości wzorcowych, co daje szybką ocenę jakości odwzorowania drgań w danym momencie iteracji. Wykresy rozproszenia danych dla dwóch kanałów zostały przedstawione na rysunku 8.10.



**Rys. 8.10** Wykresy rozproszenia przefiltrowanych wartości sygnału docelowego i odpowiedzi układu dla kanałów 1 i 2

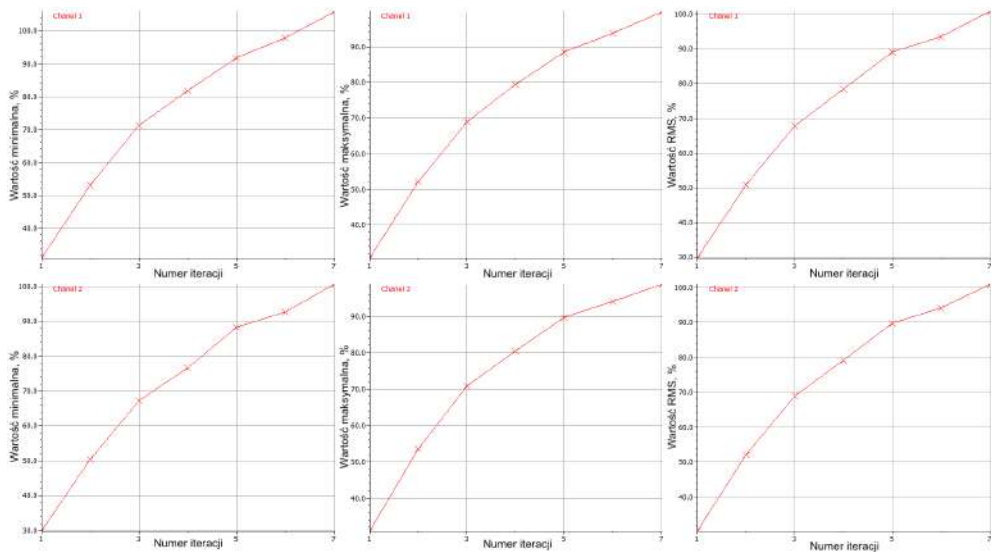
Na rysunku 8.10 przedstawiono wykresy rozproszenia przefiltrowanych wartości sygnału docelowego oraz odpowiadających im wartości sygnału uzyskanego na stanowisku badawczym dla dwóch kanałów pomiarowych. Wykresy te umożliwiają bezpośrednią ocenę stopnia zgodności sygnałów w dziedzinie amplitudy, niezależnie od przebiegu czasowego.

Widoczne skupienie punktów wzdłuż przekątnej układu współrzędnych świadczy o wysokiej korelacji pomiędzy sygnałem docelowym a odpowiedzią układu, co potwierdza skuteczność procesu iteracyjnej replikacji drgań. Rozproszenie punktów wokół tej linii jest relatywnie niewielkie i ma charakter losowy, co wskazuje na brak systematycznych błędów odwzorowania.

Nieliczne punkty oddalone od głównego skupiska mogą być związane z lokalnymi impulsami o dużej amplitudzie lub z nieliniowościami układu

zawieszenia i ograniczeniami dynamicznymi pulsatorów elektrohydraulicznych. Ogólny charakter wykresów potwierdza jednak, że osiągnięto bardzo dobrą zgodność pomiędzy sygnałem wzorcowym a odpowiedzią dynamiczną układu w końcowej iteracji procesu replikacji.

Równoległe prowadzona jest analiza trendu wartości minimalnych, maksymalnych i RMS (średnia kwadratowa) w kolejnych krokach iteracyjnych. Zwykle obserwuje się zbliżanie się wartości ekstremalnych i RMS sygnału uzyskanego do wartości docelowych, co sygnalizuje rosnącą dokładność odwzorowania warunków drogowych. Trend wartości minimalnych, maksymalnych oraz RMS we wszystkich iteracjach został przedstawiony na rysunku dla drogi o złym stanie technicznym został przedstawiony na rysunku 8.11.



**Rys. 8.11** Trend znormalizowanych wartości minimalnych, maksymalnych oraz RMS odpowiedzi układu w kolejnych iteracjach procesu replikacji

Na rysunku 8.11 przedstawiono zmiany znormalizowanych wartości minimalnych, maksymalnych oraz skutecznych RMS odpowiedzi układu w kolejnych iteracjach procesu replikacji drgań, osobno dla osi przedniej i tylnej motocykla. Wykresy te umożliwiają ilościową ocenę zbieżności procesu iteracyjnego oraz tempa poprawy zgodności pomiędzy sygnałem docelowym a odpowiedzią uzyskaną na stanowisku badawczym.

We wszystkich analizowanych przypadkach obserwuje się monotoniczny wzrost wartości znormalizowanych wraz z kolejnymi iteracjami, co świadczy o systematycznym zmniejszaniu różnic pomiędzy sygnałem wzorcowym a odpowiedzią układu. Szczególnie szybka poprawa widoczna jest w pierwszych iteracjach, natomiast w końcowej fazie procesu przyrosty wartości ulegają spowolnieniu, co jest charakterystyczne dla algorytmów iteracyjnych dążących do stanu nasycenia.

Zbieżność trendów dla wartości minimalnych, maksymalnych oraz RMS potwierdza, że korekcja sygnału sterującego prowadzi do poprawy odwzorowania zarówno ekstremów amplitudowych, jak i ogólnego poziomu energii drgań. Uzyskane rezultaty potwierdzają skuteczność zastosowanej metody replikacji i uzasadniają przyjęcie ostatniej iteracji jako reprezentatywnej do dalszych analiz komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano dwie tabele 8.2 oraz 8.3 obrazujące wyniki końcowe. Dane statystyczne przedstawiające docelowe wartości oraz wartości rzeczywiste uzyskane na stanowisku – zawiera zestawienia liczbowe (wartości średnie, odchylenia standardowe, wartości minimalne i maksymalne) dla wartości docelowych i rzeczywistych uzyskanych na stanowisku.

**Tabela 8.2** Zestawienie statystycznych parametrów przyspieszeń drgań – porównanie wartości sygnału docelowego i odpowiedzi układu uzyskanej na stanowisku badawczym wraz z błędami procentowymi

Kanał	Wartość minimalna - sygnał zadany [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość minimalna – odpowiedź układu [m/s <sup>2</sup> ]	Błąd procentowy wartości minimalnej [%]	Wartość maksymalna – sygnał zadany [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość maksymalna – odpowiedź układu [m/s <sup>2</sup> ]	Błąd procentowy wartości maksymalnej [%]
1 – oś przednia	-54.6046	-57.7136	5.69376	68.5746	68.3813	-0.281914
2 – oś tylna	-63.9854	-64.251	0.415008	78.724	77.6182	-1.40459
-	Wartość skuteczna (RMS) – sygnał zadany [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość skuteczna (RMS) – odpowiedź układu [m/s <sup>2</sup> ]	Błąd procentowy wartości skutecznej (RMS) [%]	Rozstęp (zakres) – sygnał zadany [m/s <sup>2</sup> ]	Rozstęp (zakres) – odpowiedź układu [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość średnia – sygnał zadany [m/s <sup>2</sup> ]
1 – oś przednia	16.595	16.7033	0.652383	123.179	126.095	-6.85919e-05
2 – oś tylna	17.9827	18.1082	0.698093	142.709	141.869	4.11003e-05
-	Wartość średnia – odpowiedź układu [m/s <sup>2</sup> ]	Odchylenie standardowe – sygnał zadany [m/s <sup>2</sup> ]	Odchylenie standardowe – odpowiedź układu [m/s <sup>2</sup> ]	Wariancja – sygnał zadany [m <sup>2</sup> /s <sup>4</sup> ]	Wariancja – odpowiedź układu [m <sup>2</sup> /s <sup>4</sup> ]	-
1 – oś przednia	0.000197827	16.5992	16.7075	275.532	279.139	-
2 – oś tylna	-0.000155877	17.9872	18.1128	323.54	328.073	-

W tabeli 8.2 przedstawiono szczegółowe zestawienie parametrów statystycznych przyspieszeń drgań dla osi przedniej i tylnej motocykla, obejmujące porównanie wartości sygnału docelowego oraz wartości odpowiedzi uzyskanej na stanowisku badawczym w końcowej iteracji procesu replikacji. Zestawienie obejmuje wartości minimalne, maksymalne oraz skuteczne RMS, a także odpowiadające im błędy procentowe, co umożliwia ilościową ocenę dokładności odwzorowania drgań w dziedzinie czasu.

Analiza danych wskazuje na bardzo dobrą zgodność pomiędzy wartościami docelowymi i rzeczywistymi, zarówno dla osi przedniej, jak i tylnej. Błędy procentowe dla wartości skutecznych RMS nie przekraczają 1%, co świadczy o wysokiej jakości odwzorowania ogólnego poziomu energii drgań. Również błędy wartości minimalnych i maksymalnych pozostają na niskim

poziomie, przy czym ich znaki wskazują na niewielkie niedokompensowanie lub przesterowanie sygnału w zależności od kanału pomiarowego.

W drugiej części tabeli 8.3 zaprezentowano dodatkowe miary statystyczne, takie jak rozstęp (zakres), wartość średnia, odchylenie standardowe oraz wariancja, osobno dla sygnału docelowego i odpowiedzi układu. Bardzo zbliżone wartości odchylenia standardowego i wariancji potwierdzają, że proces iteracyjnej korekcji skutecznie zachowuje strukturę statystyczną sygnału drgań. Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność zastosowanej metody replikacji i stanowią wiarygodną podstawę do dalszej analizy komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

Dane statystyczne przedstawiające wartości sygnału sterującego oraz wartości sygnału jego modyfikacji – pozwala prześledzić, jak zmienia się profil wymuszenia generowanego przez pulsatory w trakcie iteracji.

**Tabela 8.3** Statystyczne parametry sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci w kolejnej iteracji procesu replikacji

Kanal	Wartość minimalna sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość minimalna kolejnego sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość maksymalna sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość maksymalna kolejnego sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość skuteczna (RMS) sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]
1 – oś przednia	-16.1851	-18.0746	12.1174	14.2991	4.11948
2 – oś tylna	-17.4445	-20.7839	12.644	14.5916	4.11892
-	Wartość skuteczna (RMS) kolejnego sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Rozstęp (zakres) sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Rozstęp (zakres) kolejnego sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość średnia sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wartość średnia kolejnego sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]
1 – oś przednia	4.71209	28.3025	32.3737	-1.40557e-05	-1.8711e-05
2 – oś tylna	4.82956	30.0885	35.3756	5.96884e-06	1.0187e-05
-	Odchylenie standardowe sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Odchylenie standardowe kolejnego sygnału sterującego [m/s <sup>2</sup> ]	Wariancja sygnału sterującego [m <sup>2</sup> /s <sup>4</sup> ]	Wariancja kolejnego sygnału sterującego [m <sup>2</sup> /s <sup>4</sup> ]	-
1 – oś przednia	4.12051	4.71327	16.9786	22.2149	-
2 – oś tylna	4.11995	4.83077	16.974	23.3363	-

W tabeli 8.3 przedstawiono zestawienie podstawowych parametrów statystycznych sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci, uzyskanej w wyniku iteracyjnej korekcji w procesie replikacji drgań. Dane zaprezentowano osobno dla osi przedniej i tylnej motocykla, co umożliwia niezależną ocenę zmian w sygnałach sterujących przypisanych do obu kanałów pomiarowych.

Analiza wartości minimalnych i maksymalnych wskazuje na niewielkie zwiększenie zakresu amplitud sygnału sterującego w kolejnej iteracji, co świadczy o celowej korekcji wymuszeń w odpowiedzi na niedopasowanie sygnału docelowego i odpowiedzi układu w poprzednim kroku iteracyjnym. Równocześnie obserwuje się wzrost wartości skutecznej RMS, co oznacza zwiększenie energii sygnału sterującego w pasmach częstotliwości istotnych z punktu widzenia poprawy odwzorowania drgań.

Zbliżone wartości średnie, oscylujące wokół zera, potwierdzają brak składowej stałej w sygnałach sterujących oraz symetryczny charakter wymuszeń. Niewielkie różnice pomiędzy odchyleniami standardowymi i wariancjami sygnału sterującego i jego zmodyfikowanej postaci wskazują, że proces korekcji zachowuje ogólną strukturę statystyczną sygnału, wprowadzając zmiany jedynie tam, gdzie jest to niezbędne dla poprawy zgodności odpowiedzi układu z sygnałem docelowym.

Przedstawione wyniki potwierdzają, że algorytm iteracyjnej replikacji działa w sposób stabilny i kontrolowany, stopniowo modyfikując sygnał sterujący w kierunku osiągnięcia zbieżności procesu, bez generowania nadmiernych zmian amplitudowych, które mogłyby prowadzić do przesterowania układu wykonawczego.

### **8.3. Zestawienie wyników iteracji dla sześciu rodzajów nawierzchni**

W niniejszym podrozdziale zaprezentowano zbiorcze wyniki procesu iteracyjnego przeprowadzonego dla wszystkich sześciu rodzajów nawierzchni, na których wykonano badania. Celem tego zestawienia jest syntetyczna ocena dokładności replikacji drgań motocykla w warunkach laboratoryjnych oraz porównanie skuteczności procesu odwzorowania dla różnych scenariuszy drogowych. W tym celu opracowano tabelaryczne zestawienie wyników, umożliwiające szybkie porównanie jakości dopasowania sygnałów sterujących do sygnałów wzorcowych zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych.

W tabeli 8.4 ujęto trzy podstawowe informacje charakteryzujące przebieg i efekty procesu iteracyjnego:

- minimalny błąd procentowy pomiędzy sygnałem wzorcowym, a sygnałem uzyskanym na stanowisku badawczym w najlepszej iteracji, rozumiany jako najmniejszy poziom niedopasowania osiągnięty w całym procesie
- maksymalny błąd procentowy, obrazujący najgorsze odchylenie zarejestrowane na dowolnym etapie iteracji,
- numer iteracji, w której uzyskano najlepsze rezultaty odwzorowania, zazwyczaj odpowiadający osiągnięciu minimalnego błędu procentowego.

Zestawienie obejmuje wszystkie analizowane rodzaje nawierzchni – od nawierzchni asfaltowych o dobrym stanie technicznym, poprzez asfalt o złym stanie technicznym, kostkę brukową i prefabrykowane płyty betonowe, aż po elementy wymuszające w postaci progów zwalniających.

Tak szeroki zakres danych umożliwia wstępną ocenę, które scenariusze drogowe charakteryzowały się większą złożonością drgań i w konsekwencji wymagały większej liczby korekt sygnału sterującego w oprogramowaniu Moog Replication, a w których przypadkach uzyskanie zadowalającego poziomu zgodności sygnałów było stosunkowo łatwe.

**Tabela 8.4** Procentowy błąd minimalny i maksymalny uzyskany na stanowisku badawczym dla przedniej i tylnej osi motocykla dla sześciu rodzajów nawierzchni

Rodzaj nawierzchni	Docelowa liczba iteracji	Błąd minimalny [%]		Błąd maksymalny [%]	
		Przednia oś	Tylna oś	Przednia oś	Tylna oś
<b>Droga z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym</b>	4	-4.15	6.88	-1,16	7.48
<b>Droga z nawierzchnią o złym stanie technicznym</b>	7	5.69	0.41	-0,28	-1.40
<b>Droga z kostki brukowej</b>	5	-5.16	-4.09	-2.46	2.17
<b>Droga z prefabrykowanych płyt betonowych</b>	4	7.24	-1.76	-8.71	4.80
<b>Droga z progiem podrzutowym do 10 km/h</b>	7	4.72	-5.13	-8.89	-6.36
<b>Droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h</b>	9	6.25	0.38	-8.97	-1.75

Powyższa tabela zbiorczo przedstawia minimalne i maksymalne błędy procentowe uzyskane podczas najlepszych iteracji procesu odwzorowania drgań motocykla dla sześciu różnych typów nawierzchni. W kolumnie

„Docelowa liczba iteracji” wskazano numer iteracji, w której osiągnięto najbardziej zadowalające wyniki replikacji. Z zestawienia wynika, że liczba niezbędnych iteracji mieściła się w przedziale od 4 do 9, w zależności od rodzaju nawierzchni oraz stopnia złożoności generowanych przez nią drgań.

Kolejne kolumny tabeli prezentują wartości błędów minimalnych i maksymalnych osobno dla osi przedniej i tylnej motocykla. Wartości ujemne (np.  $-4,15\%$  czy  $-8,97\%$ ) oznaczają sytuację, w której sygnał uzyskany na stanowisku badawczym był nieznacznie niższy od sygnału wzorcowego, co można interpretować jako niedokompensowanie wymuszeń. Z kolei wartości dodatnie wskazują na pewne przesterowanie, czyli przewyższenie poziomu sygnału względem wartości docelowej. Przykładowo, w przypadku nawierzchni o dobrym stanie technicznym proces iteracyjny zakończył się po czterech iteracjach, przy czym odnotowano błąd minimalny  $-4,15\%$  na osi przedniej oraz błąd maksymalny  $-1,16\%$ , co świadczy o niewielkim i akceptowalnym poziomie niedokompensowania w końcowym etapie procesu.

Porównując poszczególne rodzaje nawierzchni, można zauważyć, że w przypadku nawierzchni o charakterze bardziej impulsowym, takich jak kostka brukowa czy próg podrzutowy, dominują wartości ujemne błędów. Wskazuje to na trudności w idealnym odwzorowaniu gwałtownych, krótkotrwałych wstrząsów, które są szczególnie wymagające z

Z punktu widzenia dynamiki układu elektrohydraulicznego. Z kolei dla asfaltu o złym stanie technicznym częściej pojawiają się wartości dodatnie, co sugeruje okresowe przesterowanie sygnału sterującego w procesie iteracyjnym. Dane te pozwalają określić, w jakim stopniu procedura iteracyjna zastosowana w oprogramowaniu Moog Replication była

w stanie odwzorować charakterystyczne drgania występujące w różnych warunkach drogowych.

Przedstawione w niniejszym podrozdziale wyniki potwierdzają skuteczność zastosowanej metodyki odwzorowania drgań na stanowisku badawczym. Iteracyjna modyfikacja sygnału sterującego umożliwiła stopniowe ograniczanie błędów zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, aż do poziomu zapewniającego wiarygodną analizę drgań motocykla. Uzyskane rezultaty stanowią solidną podstawę do dalszych badań nad komfortem i bezpieczeństwem motocyklisty oraz do formułowania wniosków dotyczących oceny efektywności procesu replikacji.

Iteracyjny charakter badań pozwolił jednocześnie na identyfikację nieliniowości oraz niepożądanych zachowań układu zawieszenia w zależności od pasma częstotliwości i poziomu wymuszeń. W konsekwencji możliwe jest podejmowanie świadomych decyzji projektowych i diagnostycznych, takich jak modyfikacja geometrii układu, zmiana parametrów tłumienia czy wdrażanie dodatkowych strategii kompensacji w wyższych zakresach częstotliwości. Rezultaty przeprowadzonych badań, opisane w niniejszym podrozdziale, stanowią istotny krok w kierunku kompleksowej oceny dynamicznych właściwości motocykla oraz dalszych prac badawczo-rozwojowych ukierunkowanych na poprawę komfortu i bezpieczeństwa kierującego, które zostaną przedstawione w kolejnym rozdziale pracy.

## **9. Modyfikacja zawieszenia oraz manetek kierownicy**

W niniejszym rozdziale omówiono szczegółowe modyfikacje zawieszenia oraz układu kierowniczego motocykla, które zostały przeprowadzone w ramach badań ukierunkowanych na poprawę komfortu oraz bezpieczeństwa motocyklisty. Głównym celem wprowadzonych zmian było dostosowanie parametrów pracy zawieszenia oraz zastosowanie nowych materiałów w konstrukcji manetek kierownicy do specyficznych wymagań wynikających z analizy drgań oddziałujących na kierowcę. Modyfikacje te miały bezpośredni wpływ na subiektywne odczucia komfortu jazdy.

Pierwsza z wprowadzonych modyfikacji dotyczyła zastosowania zawieszenia pneumatycznego w układzie tylnego zawieszenia motocykla. Tego rodzaju rozwiązanie umożliwia dynamiczną zmianę sztywności zawieszenia poprzez regulację ciśnienia powietrza w amortyzatorach. Dzięki temu możliwe jest dostosowanie charakterystyki pracy zawieszenia do zróżnicowanych warunków drogowych oraz indywidualnych preferencji kierowcy. Regulacja ta ma istotny wpływ na redukcję drgań przenoszonych na siedzisko oraz na poprawę stabilności prowadzenia motocykla, co bezpośrednio przekłada się na komfort i bezpieczeństwo jazdy. Zmodyfikowane zawieszenie tylne zastosowane w motocyklu Yamaha XV 125 przedstawiono na rysunku 9.1.



**Rys. 9.1** Zmodyfikowane zawieszenie tylne w motocyklu Yamaha XV 125

Kolejna modyfikacja została przeprowadzona w obrębie przedniego zawieszenia motocykla. W tym przypadku zastosowano dodatkowy amortyzator wyposażony w mechanizm regulacji tłumienia oraz możliwość całkowitej blokady skoku. Rozwiązanie to pozwala na precyzyjne dostosowanie charakterystyki tłumienia do aktualnych warunków eksploatacyjnych. Dodatkowo wprowadzono możliwość regulacji ciśnienia w komorze powietrznej, co umożliwi dalsze kształtowanie charakterystyki dynamicznej przedniego zawieszenia. Szczegóły tej modyfikacji przedstawiono na rysunku 9.2.



**Rys. 9.2** Zmodyfikowane zawieszenie przednie w motocyklu Yamaha XV 125

Istotnym elementem badań, mającym na celu poprawę ergonomii oraz komfortu użytkowania motocykla, była również modyfikacja manetek kierownicy. W ramach prac zaprojektowano i wykonano dwa nowe modele manetek, wykorzystując nowoczesne technologie druku 3D z materiału Fiberlogy 40D oraz RosaFlex96A. Do ich produkcji zastosowano różne materiały o odmiennych właściwościach mechanicznych, co przedstawiono na rysunku 9.3. Oba zaprojektowane modele stanowią rozwiązania autorskie – wcześniej nie były publikowane wyniki badań dotyczące ich skuteczności w tłumieniu drgań, co nadaje im szczególne znaczenie naukowe i aplikacyjne.



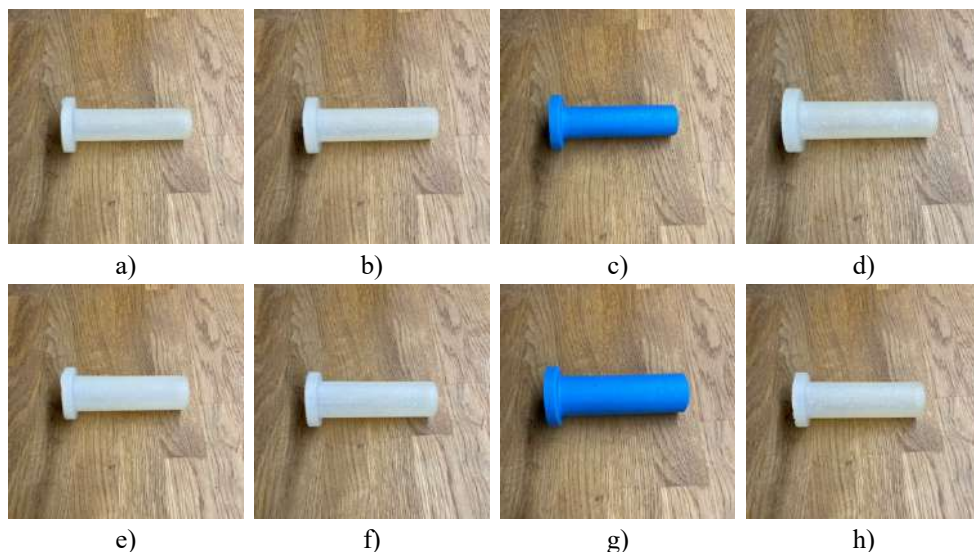
a)



b)

**Rys. 9.3** Manetki wykonanych w technologii druku 3D  
a – Fiberlogy 40D, b – RosaFlex96A

W celu poszukiwania kolejnych rozwiązań konstrukcyjnych wykonano osiem dodatkowych wariantów manetek, odlewanych z różnych kompozytów żelowych. Formy do odlewu tych manetek zostały zaprojektowane w programie SolidWorks, a następnie wydrukowane na drukarce 3D. Odlanie manetek z czterech różnych kompozytów o dwóch różnych grubościach ścianki 2 mm oraz 4 mm pozwoliło na uzyskanie wariantów o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych i dotykowych. Wykonane warianty zaprezentowano na rysunku 9.4, wraz z wyszczególnieniem twardości materiału w skali Shore'a oraz grubości ścianek.



**Rys. 9.4** Manetki wykonane z ciekłej żywicy silikonowej

a – o twardości Shore’a 13, grubości ścianki 5 mm, b – o twardości Shore’a 22, grubości ścianki 5 mm, c – o twardości Shore’a 33, grubości ścianki 5 mm, d – o twardości Shore’a 45, grubości ścianki 5 mm, e – o twardości Shore’a 13, grubości ścianki 10 mm, f – o twardości Shore’a 22, grubości ścianki 10 mm, g – o twardości Shore’a 33, grubości ścianki 10 mm, h – o twardości Shore’a 45, grubości ścianki 10 mm

Przedstawione modyfikacje stanowią kluczowy element badań nad optymalizacją parametrów motocykla w kontekście redukcji drgań oraz poprawy komfortu i bezpieczeństwa kierowcy. W dalszej części rozdziału zostaną zaprezentowane szczegółowe analizy i wyniki testów, które pozwolą na ocenę skuteczności wprowadzonych zmian.

## 9.1. Metodyka badań i procedura pomiarowa

W celu określenia wpływu wprowadzonych zmian konstrukcyjnych w motocyklu – opisanych w poprzednich podrozdziałach – na poprawę komfortu jazdy oraz zwiększenie bezpieczeństwa, przeprowadzono serię pomiarów drgań w warunkach stanowiska badawczego. Poniżej

przedstawiono najważniejsze założenia metodyczne i organizacyjne podjętych badań.

Pierwszym etapem było przygotowanie motocykla z uwzględnieniem wszystkich opisanych modyfikacji zawieszenia (zarówno tylnego, jak i przedniego) oraz wymienionych wariantów manetek. W każdej konfiguracji dążono do zachowania takich samych, powtarzalnych warunków testowych, co pozwoliło rzetelnie porównywać wpływ poszczególnych zmian.

Pomiary przeprowadzano na stanowisku badawczym, gdzie możliwe było odtworzenie różnych warunków drogowych. Podczas każdej próby motocykl obciążano w identyczny sposób. Taka procedura miała na celu wyeliminowanie różnic w rozkładzie masy, które mogłyby wpłynąć na wyniki pomiarów.

Do rejestracji przyspieszeń drgań zastosowano zestaw akcelerometrów, mocowanych na kierownicy oraz bezpośrednio przy siedzisku motocykla. Przyrządy te pracowały w trzech osiach, rejestrując przyspieszenia w kierunku pionowym, poprzecznym oraz wzdłużnym. Dzięki takiemu rozmieszczeniu czujników możliwe było uchwycenie pełnego spektrum wibracji odczuwanych przez kierowcę.

Każda seria pomiarowa obejmowała identyczne ustawienia motocykla w zakresie modyfikacji zawieszenia i wariantu zastosowanych manetek. Zarejestrowane sygnały analizowano następnie w dziedzinie czasu oraz częstotliwości (m.in. poprzez obliczanie wartości skutecznej RMS oraz transformację Fouriera), co umożliwiło szczegółowe porównanie wpływu poszczególnych zmian. Taka metodyka pozwoliła wiarygodnie ocenić, w jakim stopniu modyfikacje motocykla wpływają na poziom drgań i w konsekwencji na komfort oraz bezpieczeństwo jazdy.

## **9.2. Analiza wpływu modyfikacji na drgania, komfort i bezpieczeństwo motocyklisty**

W celu poprawy komfortu jazdy motocyklem oraz ograniczenia negatywnego oddziaływania drgań na organizm kierowcy przeprowadzono szereg modyfikacji konstrukcyjnych obejmujących zawieszenie przednie i tylne oraz uchwyty manetki kierownicy. Zmiany te miały na celu dostosowanie charakterystyki dynamicznej pojazdu do różnych warunków nawierzchniowych oraz ograniczenie przenoszenia drgań na kierownicę i siedzisko motocykla. Należy podkreślić, że redukcja poziomu drgań wpływa przede wszystkim na komfort jazdy oraz zmniejszenie zmęczenia kierowcy, co pośrednio może przekładać się na poprawę bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu.

Wszystkie modyfikacje zostały poddane analizie w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem dedykowanego stanowiska badawczego umożliwiającego odtwarzanie rzeczywistych wymuszeń drogowych. Rejestrowano wartości przyspieszeń liniowych przy pomocy czujników umieszczonych na kierownicy oraz na siedzisku motocykla. Stopień redukcji drgań określono na podstawie względnej zmiany wartości skutecznej (RMS) przyspieszeń w odniesieniu do konfiguracji bazowej motocykla. W celu zwiększenia wiarygodności wyników, dla każdej konfiguracji konstrukcyjnej wykonywano trzykrotne pomiary, a uzyskane wartości uśredniano.

Zakres analizy obejmował 22 konfiguracje modyfikacyjne (3 warianty zawieszenia tylnego, 9 wariantów zawieszenia przedniego oraz 10 wariantów manetek), które testowano w sześciu scenariuszach odpowiadających różnym typom nawierzchni drogowych. Łącznie przeanalizowano 132 przypadki

pomiarowe, co pozwoliło na kompleksową ocenę wpływu poszczególnych modyfikacji na poziom drgań oddziałujących na motocyklistę.

W tabeli 9.1 przedstawiono zestawienie optymalnych konfiguracji dla poszczególnych nawierzchni drogowych, obejmujących parametry zawieszenia tylnego (ciśnienie pneumatyczne), zawieszenia przedniego (tłumienie odbicia oraz ciśnienie robocze) oraz właściwości manetek (materiał, twardość i grubość). Dla każdej z modyfikacji określono indywidualny stopień redukcji drgań. Należy zaznaczyć, że wartości te odnoszą się do wpływu pojedynczych zmian konstrukcyjnych i nie powinny być sumowane, gdyż oddziaływania poszczególnych elementów mają charakter nieliniowy i wzajemnie zależny.

**Tabela 9.1** Dobór modyfikacji zawieszenia i manetek motocykla w zależności od rodzaju nawierzchni oraz ich wpływ na redukcję drgań

Nawierzchnia	Zmiana parametrów zawieszenia tylnego	Redukcja drgań [%]	Zmiana parametrów zawieszenia przedniego	Redukcja drgań [%]	Parametry manetki	Redukcja drgań [%]
<b>Droga z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym</b>	ciśnienie 0,05 MPa	6	tłumienie 0%, ciśnienie 0%	4	manetka z żywicy silikonowej, Shore 22, 5 mm	4
<b>Droga z nawierzchnią o złym stanie technicznym</b>	ciśnienie 0,025 MPa	12	tłumienie 50%, ciśnienie 25%	0	manetka z żywicy silikonowej, Shore 13, 10 mm	7
<b>Droga z kostki brukowej</b>	ciśnienie 0,025 MPa	13	tłumienie 50%, ciśnienie 0%	2	manetka z żywicy silikonowej, Shore 13, 10 mm	7
<b>Droga z prefabrykowanymi płytami betonowymi</b>	ciśnienie 0,05 MPa	11	tłumienie 100%, ciśnienie 0%	10	manetka z żywicy silikonowej, Shore 22, 10 mm	6
<b>Droga z progiem podrzutowym do 10 km/h</b>	ciśnienie 0,025 MPa	13	tłumienie 100%, ciśnienie 50%	12	manetka z żywicy silikonowej, Shore 33, 10 mm	9
<b>Droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h</b>	ciśnienie 0,05 MPa	12	tłumienie 100%, ciśnienie 25%	9	manetka z żywicy silikonowej, Shore 22, 10 mm	3

Analiza wyników wskazuje, że największą skuteczność w redukcji drgań uzyskano na nawierzchniach o znacznym stopniu nierówności, takich jak kostka brukowa, nawierzchnie z płyt betonowych oraz odcinki z progami zwalniającymi. W tych warunkach dominującą rolę odgrywało tylne zawieszenie o obniżonym ciśnieniu (0,025 MPa), które działało jako element skutecznie filtrujący drgania o niskich i średnich częstotliwościach. Jednocześnie zwiększenie tłumienia w zawieszeniu przednim ograniczało przenoszenie drgań na kierownicę, poprawiając stabilność prowadzenia pojazdu.

Istotny wpływ na redukcję drgań oddziałujących na dłonie kierowcy miały również właściwości manetek. Zastosowanie manetek wykonanych z miękkiej żywicy silikonowej o niskiej twardości (Shore 13–22) oraz zwiększonej grubości ścianki (10 mm) prowadziło do wyraźnego ograniczenia amplitudy drgań wysokoczęstotliwościowych. Efekt ten jest szczególnie istotny w kontekście oddziaływania drgań na układ ręka–ramię, zgodnie z zaleceniami normy ISO 5349.

Na nawierzchniach o wysokiej równości (asfalt w dobrym stanie technicznym) optymalne rezultaty uzyskano przy zastosowaniu bardziej sztywnych ustawień zawieszenia oraz manetek o wyższej twardości. W takich warunkach nadmierne zmiękczenie układu zawieszenia mogłoby prowadzić do pogorszenia precyzji prowadzenia pojazdu, co wskazuje na konieczność kompromisu pomiędzy komfortem a właściwościami jezdnyimi.

Uzyskane wyniki są zgodne z ogólnymi zasadami oceny oddziaływania drgań na człowieka, określonymi m.in. w normie ISO 2631, która wskazuje, że kluczowe znaczenie dla odczuwanego komfortu ma wartość skuteczna przyspieszeń oraz zakres częstotliwości drgań. Redukcja drgań w zakresie niskich częstotliwości (oddziałujących na całe ciało) oraz

wysokich częstotliwości (oddziałujących lokalnie na dłonie) przyczynia się do ograniczenia zmęczenia kierowcy oraz poprawy warunków eksploatacyjnych motocykla.

Przeprowadzona analiza wykazała, że największy wpływ na redukcję drgań oddziałujących na motocyklistę ma odpowiedni dobór parametrów tylnego zawieszenia. Obniżenie ciśnienia w amortyzatorze skutecznie ograniczało przenoszenie drgań generowanych przez nierówności nawierzchni, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości. Zjawisko to można interpretować jako efekt działania zawieszenia jako układu tłumiącego o charakterystyce dolnoprzepustowej.

Zawieszenie przednie pełniło istotną rolę w ograniczaniu drgań przenoszonych na układ kierowniczy. Zwiększenie tłumienia odbicia oraz odpowiedni dobór ciśnienia roboczego pozwalały na skuteczne ograniczenie amplitudy drgań w obszarze kierownicy, co przekładało się na poprawę stabilności prowadzenia pojazdu oraz komfortu pracy rąk kierowcy.

Zastosowanie odpowiednich manetek stanowiło uzupełnienie działania układu zawieszenia, wpływając głównie na redukcję drgań wysokoczęstotliwościowych. Ich działanie ma charakter lokalny i nie wpływa istotnie na globalną dynamikę pojazdu, jednak odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu zmęczenia dłoni i poprawie ergonomii jazdy.

Najlepsze efekty uzyskano w wyniku jednoczesnego zastosowania odpowiednio dobranych parametrów zawieszenia oraz manetek, co wskazuje na synergiczny charakter oddziaływania poszczególnych modyfikacji. Należy jednak podkreślić, że wpływ każdej zmiany konstrukcyjnej powinien być analizowany indywidualnie, a ich efekty nie są addytywne.

Wyniki badań potwierdzają, że skuteczna redukcja drgań wymaga dostosowania charakterystyki zawieszenia i elementów kontaktu kierowcy z pojazdem do warunków eksploatacyjnych. Opracowane rozwiązania mogą stanowić podstawę do dalszej optymalizacji konstrukcji motocykli w kierunku poprawy komfortu jazdy oraz ograniczenia negatywnego wpływu drgań na organizm człowieka.

## **10. Metodyka modelowania i analiz numerycznych motocykla w badaniach drgań**

W niniejszej pracy przyjęto zintegrowane podejście badawcze, łączące eksperymenty drogowe z analizami symulacyjnymi, których celem była ocena wpływu drgań motocykla na komfort oraz bezpieczeństwo kierowcy. Rozdział poświęcony modelowaniu motocykla w środowisku CAD (SolidWorks) oraz analizom numerycznym realizowanym w programie LS-DYNA stanowi jeden z kluczowych elementów prowadzonych badań. Zastosowanie narzędzi symulacyjnych umożliwiło odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych w kontrolowanym środowisku obliczeniowym oraz analizę zjawisk dynamicznych trudnych do jednoznacznej identyfikacji w warunkach pomiarów terenowych.

Modele numeryczne motocykla zostały zaprojektowane w taki sposób, aby możliwie wiernie odzwierciedlały rzeczywiste oddziaływania dynamiczne rejestrowane podczas testów drogowych prowadzonych na różnych typach nawierzchni. W symulacjach uwzględniono parametry geometryczne, masowe oraz materiałowe motocykla, a także zmienne warunki wymuszeń wibracyjnych, odpowiadające rzeczywistym profilom drgań. Takie podejście umożliwiło bezpośrednie porównanie wyników symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi.

Zastosowanie symulacji komputerowych pozwoliło nie tylko na analizę odpowiedzi dynamicznej motocykla na konkretne wymuszenia drogowe, lecz również stworzyło podstawę do testowania różnych wariantów konstrukcyjnych bez konieczności fizycznego prototypowania każdego z nich. Opracowana baza modelowa stanowi uniwersalne narzędzie

badawcze, które może być w przyszłości wykorzystane do prowadzenia rozszerzonych analiz inżynierskich, obejmujących m.in. alternatywne systemy zawieszenia, rozwiązania adaptacyjne czy struktury tłumiące o zmiennych właściwościach. Model numeryczny motocykla pełni zatem nie tylko funkcję diagnostyczną, ale również predykcyjną, umożliwiając dalszą optymalizację konstrukcji jednośladów z punktu widzenia komfortu wibracyjnego i bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

Środowisko SolidWorks, jako jedno z najczęściej stosowanych narzędzi klasy CAD, umożliwia tworzenie precyzyjnych modeli trójwymiarowych, wiernie odwzorowujących geometrię oraz właściwości materiałowe obiektów technicznych [100]. Z kolei LS-DYNA, będący zaawansowanym programem do analiz metodą elementów skończonych (MES), pozwala na symulację dynamicznych zachowań układów mechanicznych w odpowiedzi na złożone obciążenia, w tym również wymuszenia wibracyjne [101]. Połączenie tych dwóch narzędzi umożliwia przeprowadzenie kompleksowych analiz obejmujących zarówno modelowanie fizyczne, jak i ocenę wpływu drgań na komfort oraz bezpieczeństwo kierowcy.

Celem niniejszego rozdziału jest szczegółowe omówienie procesu tworzenia modelu motocykla w środowisku SolidWorks oraz jego dalszej analizy numerycznej w programie LS-DYNA. Przedstawiono kolejne etapy modelowania, definiowania właściwości materiałowych oraz przygotowania modelu do symulacji dynamicznych, które stanowią podstawę do dalszych badań. Analizy te są niezbędne do zrozumienia zachowania motocykla w warunkach rzeczywistych oraz do opracowania rozwiązań minimalizujących negatywne skutki oddziaływania drgań na użytkownika.

## **10.1. Budowa struktury graficznej modelu motocykla w SolidWorks**

Proces modelowania motocykla Yamaha XV 125 w programie SolidWorks rozpoczęto od zebrania szczegółowych danych geometrycznych rzeczywistego pojazdu, na którym prowadzone były badania drogowe oraz stanowiskowe. Zgromadzone informacje obejmowały zarówno wymiary ogólne motocykla, jak i szczegółowe parametry poszczególnych komponentów, co stanowiło podstawę do opracowania dokładnego modelu trójwymiarowego.

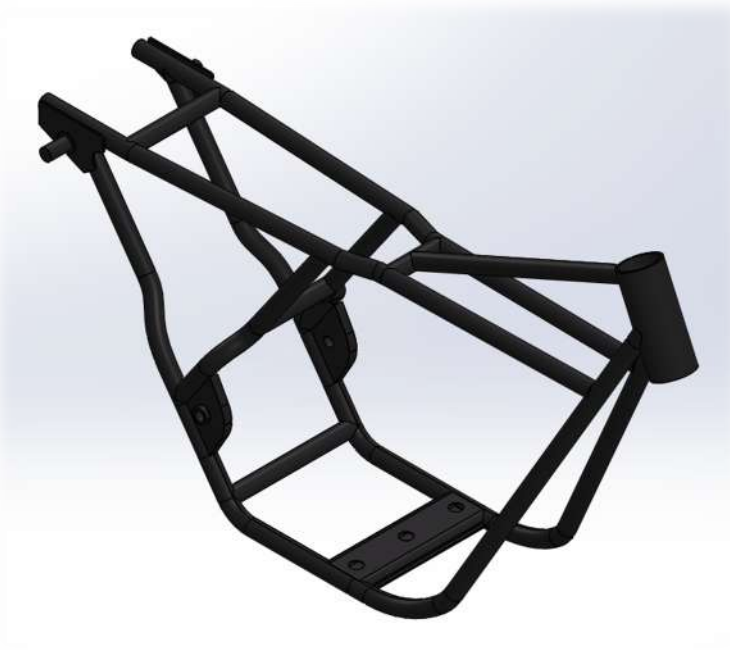
Na etapie zbierania danych, skoncentrowano się na uzyskaniu kluczowych wymiarów, które mają bezpośredni wpływ na dynamikę motocykla i komfort kierowcy. Do najważniejszych zmierzonych parametrów należały:

- skok zawieszenia tylnego i przedniego, które mają istotny wpływ na absorpcję nierówności drogi oraz stabilność pojazdu,
- całkowite wymiary motocykla, takie jak długość, szerokość oraz wysokość, które określają gabaryty pojazdu i jego pozycję w przestrzeni,
- wymiary ramy pojazdu, będącej głównym elementem nośnym motocykla,
- wymiary silnika, który jest kluczowym elementem napędowym,
- wymiary siedziska, zbiornika paliwa, obręczy kół, które wpływają na ergonomię oraz estetykę pojazdu,
- wymiary układu kierowniczego oraz zawieszenia przedniego i tylnego, które determinują manewrowość oraz komfort jazdy.

Zebrane dane posłużyły do wykonania rysunków technicznych, które następnie zostały wykorzystane w procesie modelowania 3D w SolidWorks.

Na podstawie zgromadzonych danych, przystąpiono do tworzenia poszczególnych elementów motocykla w programie SolidWorks. Proces modelowania rozpoczęto od kluczowych komponentów strukturalnych, takich jak rama motocykla, a następnie stopniowo przechodzono do bardziej szczegółowych elementów.

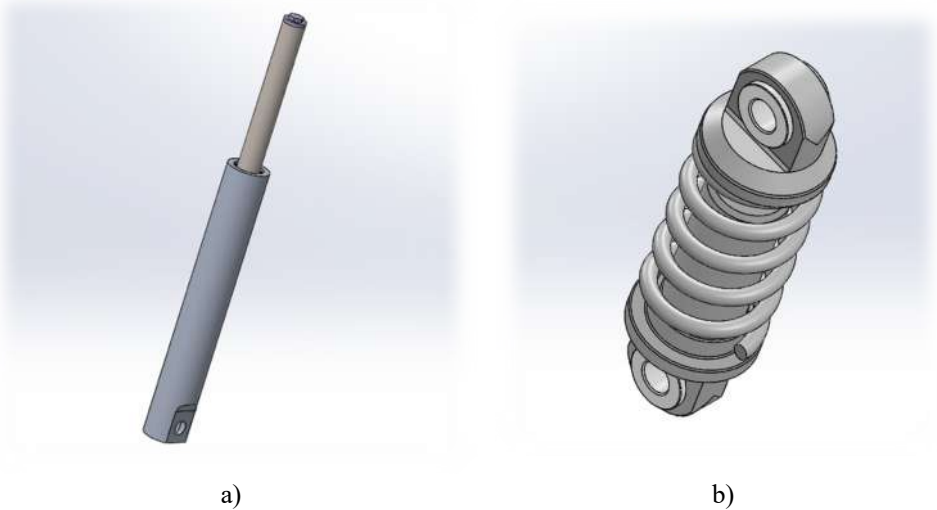
Modelowanie rozpoczęto od konstrukcji ramy przedstawionej na rysunku 10.1, która jest podstawą całej struktury pojazdu. Wykorzystując zebrane wymiary, opracowano dokładny model 3D, uwzględniając wszystkie istotne cechy geometryczne i materiałowe.



**Rys. 10.1** Model graficzny struktury ramy motocykla

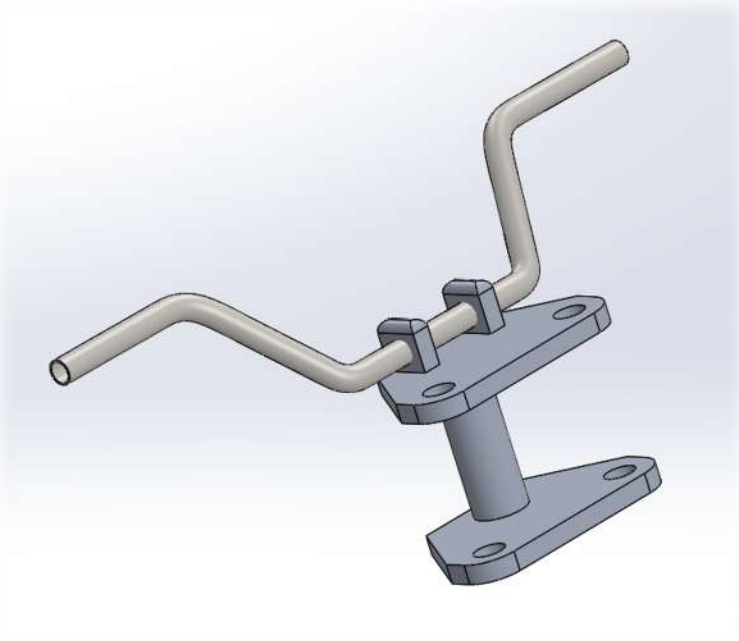
Kolejnym krokiem było odwzorowanie geometrii zawieszenia, kluczowego elementu odpowiedzialnego za komfort jazdy oraz stabilność

motocykla rys. 10.2 Szczególną uwagę zwrócono na dokładne odzwierciedlenie skoku zawieszenia, co ma istotne znaczenie w analizach dynamiki pojazdu.



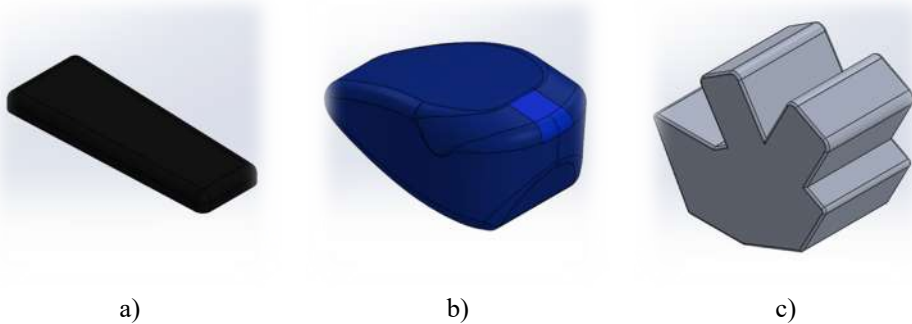
a) b)  
**Rys. 10.2** Model graficzny struktury zawieszenia  
a – przedniego, b – tylnego

W modelowaniu układu kierowniczego skoncentrowano się na precyzyjnym odwzorowaniu mechanizmu sterowania, który odpowiada za kierowność motocykla. Uwzględniono wszystkie istotne elementy, takie jak kierownica, główka ramy oraz półkę górną i dolną układu kierowniczego, które zostały przedstawione na rysunku 10.3.



**Rys. 10.3** Model graficzny struktury układu kierowniczego

W celu przeprowadzenia szczegółowych analiz numerycznych, takie elementy jak siedzisko, zbiornik paliwa oraz silnik zostały precyzyjnie odwzorowane pod względem geometrycznym rys. 10.4. Proces ten obejmował dokładne modelowanie kształtu i wymiarów tych komponentów, co jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników w dalszych etapach analizy. W modelach uwzględniono nie tylko ich rzeczywistą masę, ale także precyzyjnie określono położenie środka ciężkości każdego z tych elementów. Takie podejście umożliwia przeprowadzenie rzetelnej analizy wpływu rozmieszczenia masy na właściwości dynamiczne motocykla.



**Rys. 10.4** Model graficzny struktury  
a – siedziska, b – zbiornika paliwa, c – silnika

Każdemu z elementów modelu przypisano odpowiednie właściwości materiałowe, bazując na rzeczywistych materiałach zastosowanych w motocyklu Yamaha XV 125. Identyfikację materiałów przeprowadzono na podstawie dokumentacji technicznej producenta, w której szczegółowo określono parametry mechaniczne poszczególnych komponentów. Przykładowo, dla ramy motocykla zdefiniowano stal konstrukcyjną o właściwych parametrach wytrzymałościowych. Dane materiałowe miały kluczowe znaczenie w dalszych analizach numerycznych, szczególnie w kontekście symulacji drgań.

Po zakończeniu weryfikacji geometrii kolejnym krokiem było przypisanie właściwości materiałowych do poszczególnych komponentów motocykla. Każdemu z dziewięciu głównych komponentów przyporządkowano materiał, którego parametry dobrano w odniesieniu do danych rzeczywistych dotyczących materiałów zastosowanych w konstrukcji motocykla. Identyfikację materiałów przeprowadzono na podstawie dokumentacji technicznej producenta, w której szczegółowo określono parametry mechaniczne poszczególnych komponentów, takie jak moduł

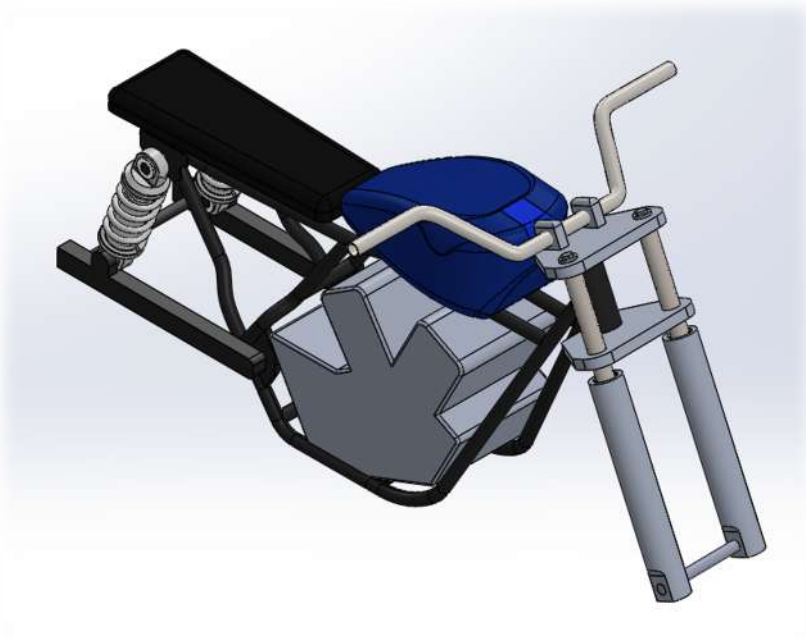
Younga, współczynnik Poissona, gęstość materiału oraz charakterystyki wytrzymałościowe.

Motocykl Yamaha XV 125 wykorzystuje zróżnicowane materiały konstrukcyjne, dobrane pod kątem wytrzymałości, masy oraz właściwości eksploatacyjnych. Rama motocykla wykonana jest z rurowej stali niskowęglowej, zapewniającej odpowiednią sztywność konstrukcji przy zachowaniu odporności na zmęczenie materiału. Z tego samego materiału wykonana jest kierownica, co umożliwia uzyskanie wymaganej wytrzymałości przy jednoczesnym tłumieniu drgań przenoszonych na dłonie kierowcy. Mocowanie kierownicy wykonano z odlewanego stopu aluminium Al-Si typu A356, charakteryzującego się korzystnym stosunkiem wytrzymałości do masy oraz dobrą odpornością korozyjną.

Siedzisko motocykla ma budowę wielowarstwową i składa się z pokrycia z PVC, rdzenia z pianki poliuretanowej, odpowiadającego za komfort użytkowania, oraz podstawy wykonanej z polipropylenu (PP), pełniącej funkcję elementu nośnego. Zbiornik paliwa wykonany jest z tłoczonej blachy stalowej niskowęglowej, co zapewnia odpowiednią szczelność, odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz trwałość eksploatacyjną. Natomiast silnik motocykla wykonano ze stopu aluminium Al-Si-Cu, który ze względu na dobrą przewodność cieplną i korzystne właściwości mechaniczne jest powszechnie stosowany w konstrukcji jednostek napędowych.

Tak zdefiniowane właściwości materiałowe zostały następnie zaimplementowane w modelu numerycznym LS-DYNA, co umożliwiło wierne odwzorowanie zachowania dynamicznego poszczególnych komponentów motocykla w trakcie symulacji obciążeń drganiowych.

W wyniku przeprowadzonych prac powstał uproszczony model 3D motocykla Yamaha XV 125 przedstawiony na rysunku 10.5, który stanowi solidną podstawę do prowadzenia dalszych analiz symulacyjnych w programie LS-DYNA. Model ten pozwala na badania dynamiki motocykla, z uwzględnieniem wpływu drgań na komfort i bezpieczeństwo kierowcy, co jest kluczowe dla celów niniejszej rozprawy doktorskiej.



Rys. 10.5 Uproszczony model graficzny struktury motocykla Yamaha XV 125

## 10.2. Przygotowanie modelu motocykla Yamaha XV 125 do symulacji w LS-DYNA

Przeniesienie modelu 3D z SolidWorks do formatu zgodnego z LS-DYNA jest kluczowym etapem przygotowania modelu do symulacji

numerycznych, ponieważ oba te programy operują w różnych środowiskach i wymagają odpowiedniego dostosowania danych. Proces ten składał się z kilku kroków, które miały na celu zapewnienie, że model opracowany w SolidWorks będzie odpowiednio przygotowany do analizy metodą elementów skończonych (MES) w LS-DYNA.

Proces przenoszenia modelu 3D motocykla Yamaha XV 125 z programu SolidWorks do LS-DYNA został zrealizowany poprzez eksport geometrii w formacie STEP, który składał się z dziewięciu głównych komponentów. Istotną zaletą tego formatu jest możliwość przenoszenia zarówno elementów bryłowych, jak i powierzchniowych, co miało znaczenie w przypadku modelu motocykla, zawierającego oba typy reprezentacji geometrycznej.

Proces eksportu modelu z SolidWorks do formatu STEP rozpoczął się od przygotowania modelu motocykla w SolidWorks. Model składający się z dziewięciu głównych komponentów, został szczegółowo zweryfikowany pod kątem spójności i kompletności, aby upewnić się, że wszystkie elementy zostały prawidłowo odwzorowane i że nie występują żadne błędy geometryczne, które mogłyby wpłynąć na dalszą analizę.

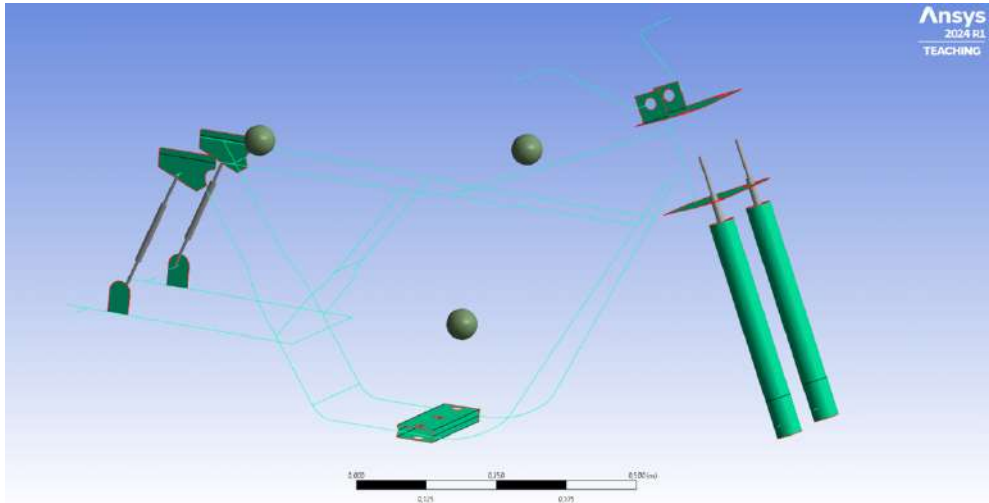
Po zakończeniu eksportu, model w formacie STEP został zaimportowany do LS-DYNA. Proces ten obejmował wstępną weryfikację geometrii w LS-DYNA, aby upewnić się, że wszystkie elementy zostały prawidłowo przeniesione, a model jest spójny i gotowy do dalszej obróbki. Szczególną uwagę zwrócono na sprawdzenie poprawności połączeń między komponentami oraz na integralność elementów powierzchniowych i bryłowych. Przeniesiony model do programu LS-DYNA został przedstawiony na rysunku 10.6.



**Rys. 10.6** Model motocykla Yamaha XV 125 zaimportowany do środowiska LS-DYNA

Na rysunku 10.6 przedstawiono model motocykla w środowisku LS-DYNA po imporcie pliku STEP. Widoczny jest sposób przeniesienia poszczególnych elementów modelu oraz możliwość ich dalszej obróbki, w tym przygotowania do analizy numerycznej.

Po imporcie modelu do LS-DYNA przeprowadzono szczegółową weryfikację geometrii, mając na celu identyfikację ewentualnych błędów geometrycznych oraz sprawdzenie integralności połączeń pomiędzy komponentami. Sprawdzone poprawność odwzorowania zarówno elementów bryłowych, jak i powierzchniowych.



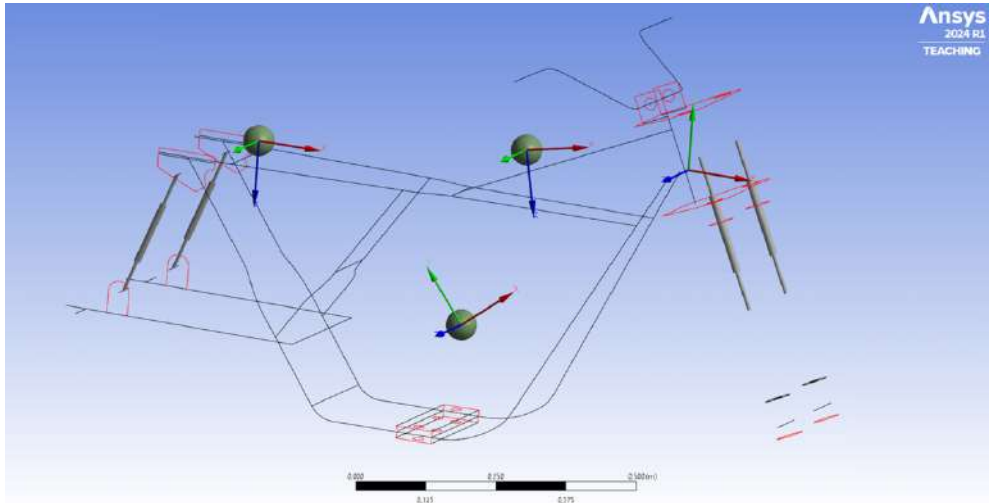
**Rys. 10.7** Weryfikacja geometrii modelu w środowisku LS-DYNA

Na rysunku 10.7 zaprezentowano etap analizy geometrii, w którym wyróżniono komponenty sprawdzane pod kątem błędów oraz niezgodności. Czynności te obejmowały kontrolę ciągłości geometrii, poprawności połączeń oraz identyfikację potencjalnych problemów, które mogłyby skutkować błędami siatkowania lub niestabilnością obliczeń.

Dodatkowo na tym etapie wykonano pomiar oraz wyznaczono położenia środków ciężkości dla kluczowych komponentów motocykla, takich jak:

- siedzisko,
- silnik,
- zbiornik paliwa.

Wyznaczone środki ciężkości tych elementów mają znaczenie w dalszych analizach, w szczególności w kontekście oceny rozkładu masy motocykla i przewidywania jego zachowania dynamicznego podczas obciążeń wymuszeniami pochodzącymi od nawierzchni.



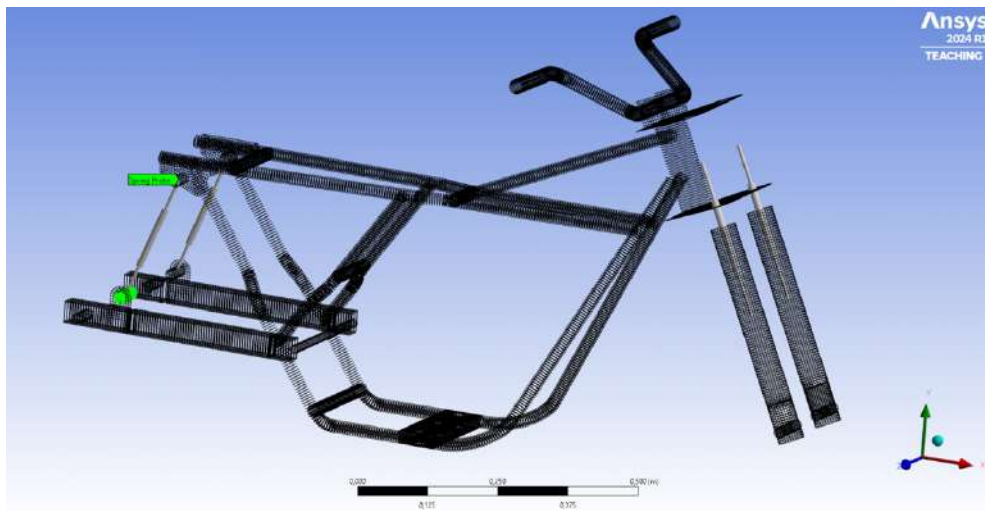
**Rys. 10.8** Wyznaczone środki ciężkości wybranych komponentów motocykla

Na rysunku 10.8 przedstawione zostały wyznaczone środki ciężkości dla kluczowych komponentów motocykla. Punkty te są istotne w dalszej analizie rozkładu masy oraz zachowania pojazdu podczas symulacji.

Po zakończeniu weryfikacji geometrii kolejnym etapem było przypisanie właściwości materiałowych do poszczególnych komponentów motocykla. Każdemu z dziewięciu głównych elementów modelu przyporządkowano materiał, którego parametry dobrano na podstawie danych rzeczywistych dotyczących materiałów zastosowanych w konstrukcji motocykla Yamaha XV 125. Uwzględniono podstawowe parametry mechaniczne, takie jak moduł Younga, współczynnik Poissona, gęstość oraz właściwości wytrzymałościowe, co umożliwiło uzyskanie modelu wiernie odwzorowującego zachowanie dynamiczne poszczególnych części pojazdu.

W kolejnym kroku przeprowadzono kontrolę przekrojów elementów modelu. Sprawdzono, czy przekroje wszystkich komponentów odpowiadają rzeczywistym wymiarom i właściwościom geometrycznym odwzorowanym

wcześniej w środowisku SolidWorks. Weryfikacja ta miała kluczowe znaczenie dla poprawności dalszych analiz MES, ponieważ dokładność odwzorowania przekrojów wpływa bezpośrednio na sztywność, masę oraz odpowiedź dynamiczną modelu.



**Rys. 10.9** Kontrola przekrojów elementów modelu

Rysunek 10.9 przedstawia kontrolę przekrojów poszczególnych komponentów, pokazując, jak dokładnie zostały odwzorowane w modelu motocyklowym przekroje, które mają wpływ na późniejsze analizy numeryczne.

Dla poprawnego przeprowadzenia analizy MES w modelu motocykla wyznaczono globalny układ współrzędnych, umożliwiający jednoznaczne definiowanie ruchów, obciążeń oraz kierunków wymuszeń w symulacji. Układ ten wykorzystano do określenia położenia elementów modelu w przestrzeni oraz do prawidłowego odwzorowania warunków dynamicznych odpowiadających rzeczywistym badaniom drogowym. Dodatkowo zdefiniowano punkty referencyjne odpowiadające osi przedniej

i tylnej motocykla, do których przyłożono przyspieszenia zarejestrowane w warunkach rzeczywistych. Takie rozwiązanie umożliwiło odwzorowanie rzeczywistych wymuszeń drogowych bez konieczności bezpośredniego modelowania kontaktu opony z nawierzchnią.

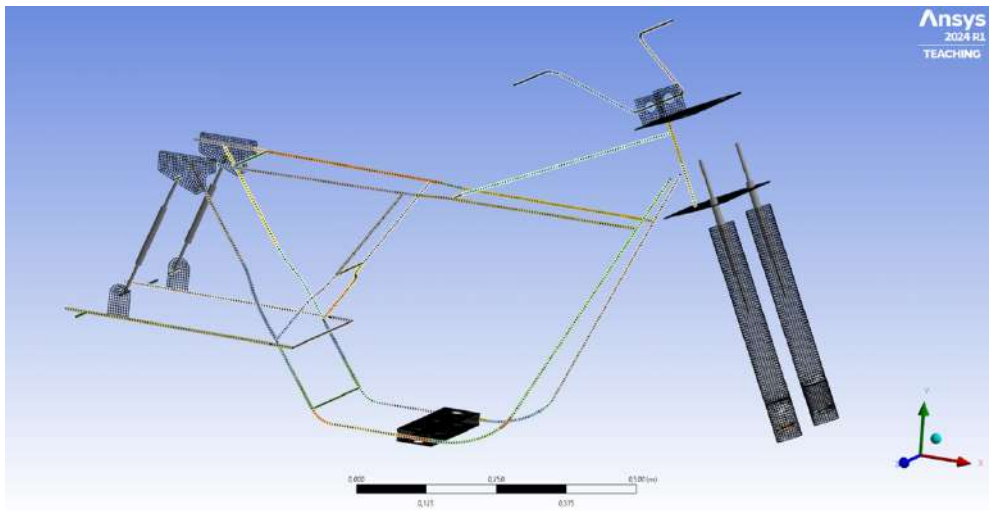
W opracowanym modelu przyjęto ponadto kilka założeń upraszczających, których celem było uzyskanie kompromisu pomiędzy dokładnością odwzorowania zjawisk fizycznych, a efektywnością obliczeniową. Połączenia pomiędzy głównymi komponentami konstrukcyjnymi motocykla traktowano jako idealizowane, bez uwzględniania luzów montażowych i lokalnych nieliniowości kontaktowych. Właściwości materiałowe przyjęto jako liniowo sprężyste, natomiast nieliniowość modelu ograniczono przede wszystkim do charakterystyk pracy elementów zawieszenia. Dodatkowo w analizie skoncentrowano się na składowej pionowej wymuszeń, ponieważ to ona w największym stopniu determinuje odpowiedź dynamiczną zawieszenia oraz poziom drgań oddziałujących na kierownicę i siedzisko motocykla.

Przyjęcie składowej pionowej jako podstawowej w analizie jest również uzasadnione z punktu widzenia oceny oddziaływania drgań na człowieka, ponieważ zgodnie z podejściem przyjętym w normie ISO 2631 drgania w kierunku pionowym należą do najistotniejszych składowych wpływających na komfort całego ciała podczas ekspozycji na drgania mechaniczne.

Po przypisaniu właściwości materiałowych oraz zdefiniowaniu układów współrzędnych model przygotowano do analizy metodą elementów skończonych. Etap ten obejmował zdefiniowanie warunków brzegowych oraz wykonanie siatki elementów skończonych. Warunki brzegowe przyjęto w postaci przyspieszeń zmiennych w czasie, zarejestrowanych podczas badań

drogowych i przyłożonych w punktach odpowiadających osi przedniej i tylnej motocykla. W analizie uwzględniono przede wszystkim składową pionową wymuszeń, ponieważ to ona w największym stopniu odzwierciedla wpływ nierówności nawierzchni na pracę zawieszenia oraz poziom drgań oddziałujących na kierownicę i siedzisko. Siatkę elementów skończonych zaprojektowano w taki sposób, aby zapewnić właściwe odwzorowanie geometrii modelu przy jednoczesnym zachowaniu kompromisu pomiędzy dokładnością obliczeń, a wydajnością numeryczną.

Rysunek 10.10 przedstawia siatkę elementów skończonych (MES) nałożoną na model motocykla. Pokazuje, jak podzielono geometrię na małe elementy, które będą poddane analizie numerycznej.



**Rys. 10.10** Siatka elementów skończonych (MES) modelu motocykla

W procesie dyskretyzacji modelu zwrócono szczególną uwagę na zachowanie odpowiedniej jakości siatki elementów skończonych w obszarach mających istotne znaczenie dla transmisji drgań, takich jak rama,

układ kierowniczy oraz punkty mocowania zawieszenia. Dobór siatki miał charakter kompromisowy i był ukierunkowany na zapewnienie wystarczającej dokładności odwzorowania odpowiedzi dynamicznej przy jednoczesnym ograniczeniu kosztu obliczeniowego. Przyjęty poziom dyskretyzacji uznano za wystarczający do analiz porównawczych prowadzonych w niniejszej pracy, których celem była ocena wpływu różnych typów wymuszeń drogowych na odpowiedź modelu motocykla.

Przeniesienie danych dotyczących amortyzatorów motocykla do programu LS-DYNA stanowi istotny etap przygotowania modelu do symulacji numerycznych. Aby uzyskać realistyczne odwzorowanie pracy zawieszenia, w tym charakterystyki tłumienia, niezbędne jest precyzyjne uwzględnienie nieliniowych właściwości amortyzatorów. W tym celu zastosowano unikalne skrypty, które umożliwiły odpowiednie wprowadzenie danych dotyczących zarówno przednich, jak i tylnych amortyzatorów motocykla Yamaha XV 125.

Dane opisujące działanie amortyzatorów przygotowano na podstawie rzeczywistych charakterystyk: siły tłumienia w funkcji prędkości oraz siły w funkcji przemieszczenia. W przypadku przedniego amortyzatora charakterystyka tłumienia wykazała zależność nieliniową, którą przekształcono do postaci tabelarycznej, obejmującej wartości prędkości i odpowiadające im wartości tłumienia. Analogicznie przygotowano tabelę siły w funkcji przemieszczenia, uwzględniającą różne poziomy ugięcia amortyzatora.

Kluczowym etapem przygotowania modelu było odwzorowanie nieliniowych charakterystyk pracy amortyzatorów przednich i tylnych. W tym celu zaimplementowano zależności siły tłumienia od prędkości oraz siły od przemieszczenia, przygotowane na podstawie rzeczywistych charakterystyk

badanych elementów zawieszenia. Dane te wprowadzono do modelu LS-DYNA w postaci tabelarycznej przy wykorzystaniu dedykowanych skryptów definiujących elementy sprężysto-tłumiące. Takie podejście umożliwiło wierne odwzorowanie zachowania układu zawieszenia i miało zasadnicze znaczenie dla poprawności symulacji drgań motocykla [102].

Analogicznie, dla tylnego amortyzatora, opracowany został skrypt wprowadzający charakterystykę tłumienia, uwzględniając różnice w parametrach w porównaniu do przedniego amortyzatora. Skrypt dla tylnego amortyzatora wyglądał podobnie, lecz zawierał dostosowane wartości tłumienia i siły.

Podobnie jak w przypadku przedniego amortyzatora, skrypt dla tylnego amortyzatora definiuje zarówno tłumienie, jak i charakterystykę sprężystości. Tego rodzaju skrypty pozwalają na dokładne odwzorowanie właściwości amortyzatorów w modelu numerycznym.

Po zaimplementowaniu charakterystyk amortyzatorów oraz wprowadzeniu danych do modelu LS-DYNA przeprowadzono serię testów weryfikacyjnych, których celem była ocena poprawności działania modelu. Porównano odpowiedzi symulacyjne z wynikami rzeczywistych badań amortyzatorów oraz z przebiegami drgań zarejestrowanymi podczas eksperymentów drogowych i stanowiskowych. Analiza wykazała konieczność kalibracji wybranych parametrów tłumienia, co pozwoliło na poprawę zgodności modelu z rzeczywistą charakterystyką pracy zawieszenia. W efekcie uzyskano model umożliwiający wiarygodne odwzorowanie nieliniowych właściwości amortyzatorów w analizie dynamicznej.

Proces wprowadzenia danych dotyczących amortyzatorów do programu LS-DYNA z wykorzystaniem dedykowanych skryptów umożliwił

odwzorowanie ich nieliniowych właściwości w analizie numerycznej. Skrypty dla amortyzatorów przednich i tylnych motocykla Yamaha XV 125 umożliwiły opis zależności tłumienia od prędkości oraz siły od przemieszczenia, co stanowiło kluczowy element w przeprowadzaniu symulacji dynamicznych. Tak przygotowany model umożliwia dalsze analizy układu zawieszenia, w tym ocenę komfortu i bezpieczeństwa podczas jazdy.

Uwzględnienie nieliniowych charakterystyk amortyzatorów miało kluczowe znaczenie dla jakości odwzorowania odpowiedzi dynamicznej modelu, ponieważ to właśnie elementy zawieszenia w największym stopniu decydują o sposobie tłumienia drgań generowanych przez nierówności nawierzchni oraz o poziomie drgań przenoszonych na motocyklistę.

Podrozdział ten szczegółowo omówił proces przygotowania modelu motocykla Yamaha XV 125 do symulacji numerycznych przy użyciu programu LS-DYNA. Zaczynając od przeniesienia geometrii z programu SolidWorks do formatu STEP, omówiono wszystkie kluczowe etapy, które pozwoliły na właściwe przygotowanie modelu do analizy metodą elementów skończonych (MES). Proces ten obejmował eksport geometrii, weryfikację poprawności połączeń, przypisanie odpowiednich właściwości materiałowych, kontrolę przekrojów elementów oraz wyznaczenie układów współrzędnych i punktów, co stanowiło fundament do przeprowadzenia zaawansowanych analiz dynamicznych.

Kolejnym istotnym etapem było wprowadzenie danych amortyzatorów do LS-DYNA. Zastosowanie dedykowanych skryptów do modelowania amortyzatorów przednich i tylnych umożliwiło odwzorowanie nieliniowych właściwości tłumienia oraz sprężystości, co miało zasadnicze znaczenie dla realizmu obliczeń. Dzięki temu możliwe stało się precyzyjne

odwzorowanie zachowania układu zawieszenia, a w konsekwencji analiza komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty.

Cały proces przygotowania modelu motocykla Yamaha XV 125 do symulacji w LS-DYNA stanowi wieloetapowe przedsięwzięcie wymagające ścisłego powiązania danych geometrycznych, materiałowych i dynamicznych. W wyniku przeprowadzonych działań opracowano model numeryczny umożliwiający prowadzenie analiz dotyczących zachowania motocykla w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, w tym w zakresie drgań, obciążeń oraz reakcji zawieszenia.

Tak przygotowany model stanowił podstawę do dalszych analiz walidacyjnych oraz do porównania odpowiedzi numerycznej z wynikami uzyskanymi podczas badań drogowych i stanowiskowych, co było niezbędne do oceny jego przydatności w badaniach drgań motocykla.

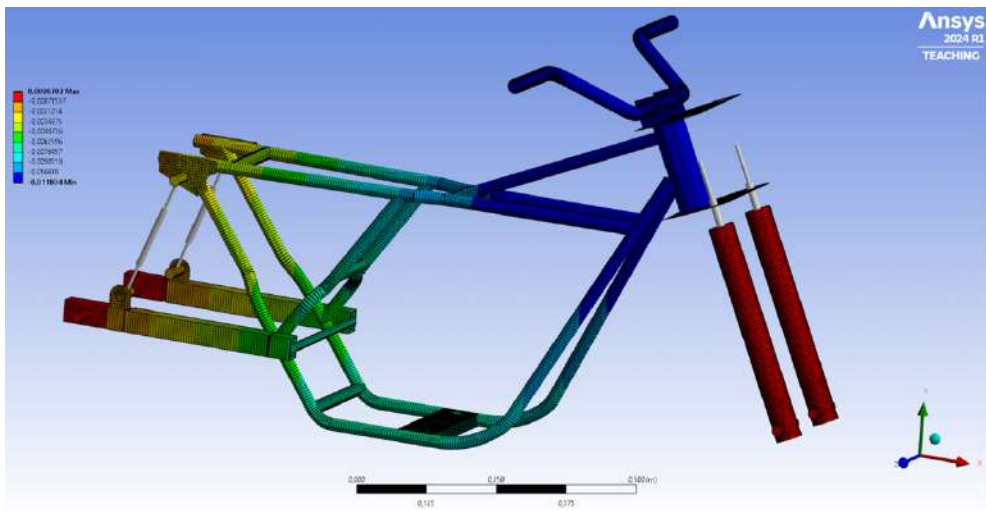
### **10.3. Przeprowadzenie symulacji motocykla Yamaha XV 125 w LS-DYNA**

Celem pierwszej symulacji motocykla Yamaha XV 125 w LS-DYNA było przeprowadzenie weryfikacji poprawności opracowanego modelu oraz porównanie uzyskanych wyników z danymi zarejestrowanymi podczas prób laboratoryjnych. Szczególny nacisk położono na ocenę drgań, które występują na kierownicy oraz siedzisku motocykla podczas jazdy po nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym.

W celu odwzorowania rzeczywistych warunków jazdy, do modelu wprowadzono dane w postaci przyspieszeń zarejestrowanych dla motocykla poruszającego się po nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym z prędkością 50 km/h. Dane te, zmienne w czasie, zostały

przyłożone do przedniej i tylnej osi motocykla, co umożliwiło odtworzenie dynamiki pojazdu w tych warunkach. Symulacja została przeprowadzona dla okresu trwającego 10 sekund, co pozwoliło na uzyskanie wystarczającej ilości danych.

Wyniki pierwszej symulacji wykazały, że różnice pomiędzy przebiegami przyspieszeń uzyskanymi w modelu LS-DYNA, a wynikami zarejestrowanymi podczas prób laboratoryjnych nie przekraczały 10%. Ocenę zgodności przeprowadzono zarówno na podstawie porównania przebiegów czasowych, jak i na podstawie względnej różnicy wartości skutecznych RMS przyspieszeń rejestrowanych na kierownicy oraz siedzisku motocykla. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność wstępnie opracowanego modelu oraz wskazały, że przyjęte założenia modelowe pozwalają na wiarygodne odwzorowanie odpowiedzi dynamicznej motocykla w analizowanych warunkach.



Rys. 10.11 Graficzne przedstawienie wyników symulacji

Wstępna kalibracja modelu wykazała konieczność korekty parametrów opisujących charakterystykę tłumienia amortyzatorów przednich i tylnych. Początkowe ustawienia nie zapewniały pełnej zgodności odpowiedzi modelu z przebiegami zarejestrowanymi eksperymentalnie, co wymagało dostosowania parametrów tłumienia do rzeczywistych właściwości pracy zawieszenia. Wprowadzone korekty pozwoliły na poprawę jakości odwzorowania drgań przenoszonych na kierownicę i siedzisko, a tym samym zwiększyły wiarygodność dalszych analiz numerycznych.

W wyniku pierwszej symulacji przeprowadzono modyfikacje charakterystyk tłumienia amortyzatorów, co poprawiło zgodność wyników z rzeczywistymi pomiarami. Kolejne kroki symulacyjne przewidywały dalsze badania dynamiki motocykla w zmiennych warunkach nawierzchniowych, co miało na celu dokładniejsze zbadanie wpływu różnych typów nawierzchni oraz prędkości jazdy na komfort i bezpieczeństwo kierowcy.

Pierwsza symulacja pozwoliła na weryfikację modelu motocykla w LS-DYNA oraz dostarczyła wartościowych wniosków dotyczących dokładności odwzorowania charakterystyk motocykla, a także wskazała obszary wymagające dalszych optymalizacji, szczególnie w kontekście tłumienia zawieszenia.

Należy jednak podkreślić, że opracowany model ma charakter uproszczony i został przygotowany przede wszystkim z myślą o analizie porównawczej wpływu różnych wymuszeń drogowych na odpowiedź dynamiczną motocykla. Model nie obejmuje bezpośredniego odwzorowania kontaktu koło–nawierzchnia ani pełnego modelu biomechanicznego kierowcy, a analiza została skoncentrowana na odpowiedzi układu w kierunku pionowym. Oznacza to, że model należy traktować jako narzędzie

do oceny trendów zmian i porównywania wariantów, a nie jako pełny model odwzorowujący wszystkie zjawiska występujące podczas rzeczywistej eksploatacji motocykla.

#### **10.4. Analiza wyników symulacji dla różnych rodzajów nawierzchni**

Symulacje komputerowe przeprowadzono dla motocykla Yamaha XV 125 poruszającego się po odcinkach drogi o zróżnicowanej charakterystyce nawierzchni. W każdym analizowanym przypadku jako warunki brzegowe w modelu numerycznym LS-DYNA zastosowano przyspieszenia wejściowe zarejestrowane podczas badań terenowych na osi przedniej i tylnej motocykla. Przyjęto wymuszenia zmienne w czasie w kierunku pionowym, ponieważ składowa pionowa przyspieszeń w największym stopniu odzwierciedla wpływ nierówności nawierzchni na dynamikę zawieszenia oraz na komfort jazdy motocyklisty.

W niniejszym podrozdziale zestawiono wyniki symulacji komputerowych z danymi zarejestrowanymi w warunkach rzeczywistych w punktach kluczowych z punktu widzenia kontaktu motocyklisty z pojazdem, tj. na kierownicy oraz na siedzisku. Porównanie przeprowadzono w dziedzinie czasu poprzez ocenę zgodności przebiegów przyspieszeń, a także ilościowo, poprzez wyznaczenie różnic pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów w oparciu o przyjęte miary porównawcze.

Jako podstawową miarę zgodności ilościowej przyjęto błąd względny wyznaczany na podstawie wartości skutecznych RMS przyspieszeń zarejestrowanych w badaniach eksperymentalnych oraz uzyskanych w symulacji. Błąd ten określano jako względną różnicę pomiędzy wartością

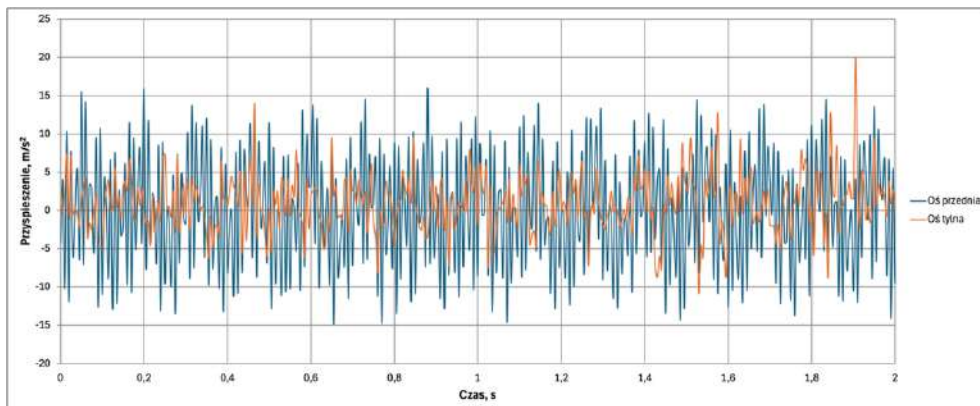
RMS sygnału symulacyjnego i eksperymentalnego, odniesioną do wartości uzyskanej w badaniach rzeczywistych i wyrażoną w procentach. Takie podejście umożliwiło jednoznaczną ocenę jakości odwzorowania odpowiedzi dynamicznej modelu w poszczególnych przypadkach nawierzchniowych.

Analizą objęto następujące odcinki:

- nawierzchnia asfaltowa o dobrym stanie technicznym,
- nawierzchnia asfaltowa o złym stanie technicznym,
- nawierzchnia z kostki brukowej,
- nawierzchnia z prefabrykowanych płyt betonowych,
- odcinek z progiem podrzutowym,
- odcinek z listwowym progiem zwalniającym.

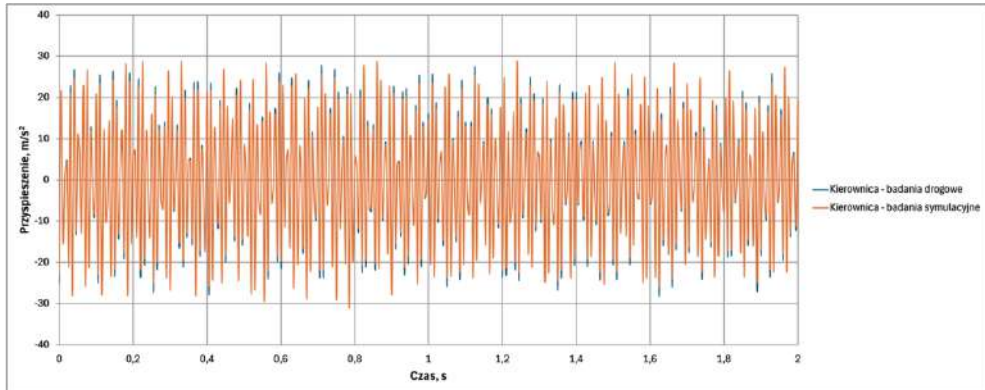
### **Nawierzchnia asfaltowa o dobrym stanie technicznym – wyniki i walidacja**

Symulację przeprowadzono dla motocykla Yamaha XV 125 poruszającego się po odcinku drogi o nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym. Przyspieszenia wejściowe zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla wykorzystano jako warunki brzegowe w modelu numerycznym. Przebiegi tych przyspieszeń, zmiennych w czasie i odnoszących się do kierunku pionowego, przedstawiono na rysunku 10.12.

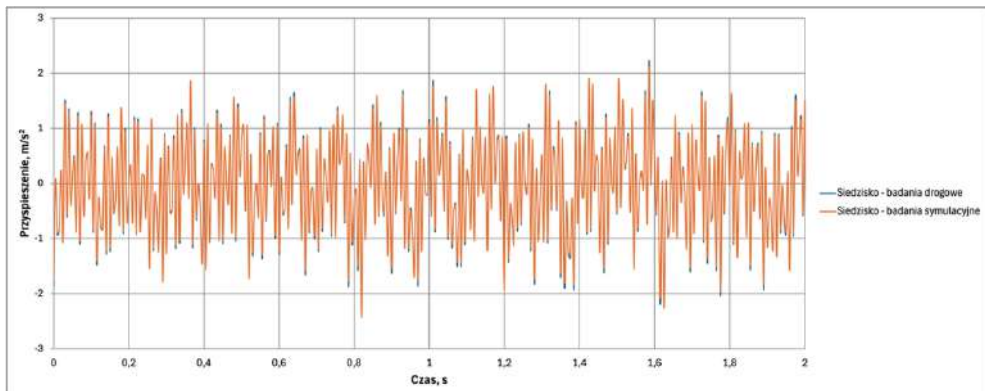


**Rys. 10.12** Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym

Wyniki symulacji komputerowej w programie LS-DYNA wykazały określone wartości przyspieszeń przenoszonych na kierownicę oraz siedzisko motocykla. Przebiegi przyspieszeń uzyskane w symulacji zestawiono z danymi zarejestrowanymi w badaniach drogowych, co przedstawiono na rysunkach 10.13 oraz 10.14. Analiza porównawcza wskazuje, że charakter przebiegów czasowych, amplitudy drgań oraz ich zmienność w czasie są zbliżone w obu przypadkach, co potwierdza poprawność przyjętych założeń modelowych.



**Rys. 10.13** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o dobrym stanie technicznym

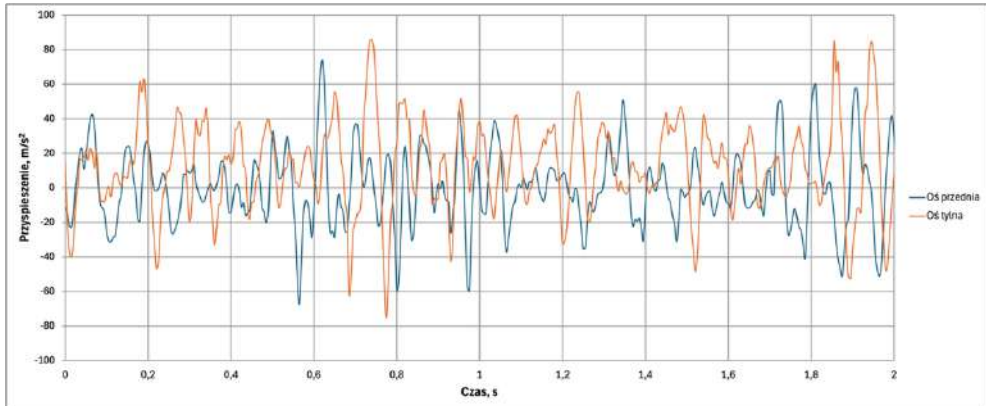


**Rys. 10.14** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o dobrym stanie technicznym

Z analizy ilościowej wynika, że różnice pomiędzy wartościami przyspieszeń uzyskanymi w symulacji i w badaniach rzeczywistych nie przekraczają 8% dla kierownicy oraz 5% dla siedziska. Otrzymane wartości błędu mieszczą się w granicach dopuszczalnych dla analiz dynamicznych tego typu i potwierdzają wysoką zgodność modelu z rzeczywistym zachowaniem motocykla.

## Nawierzchnia asfaltowa o złym stanie technicznym – wyniki i walidacja

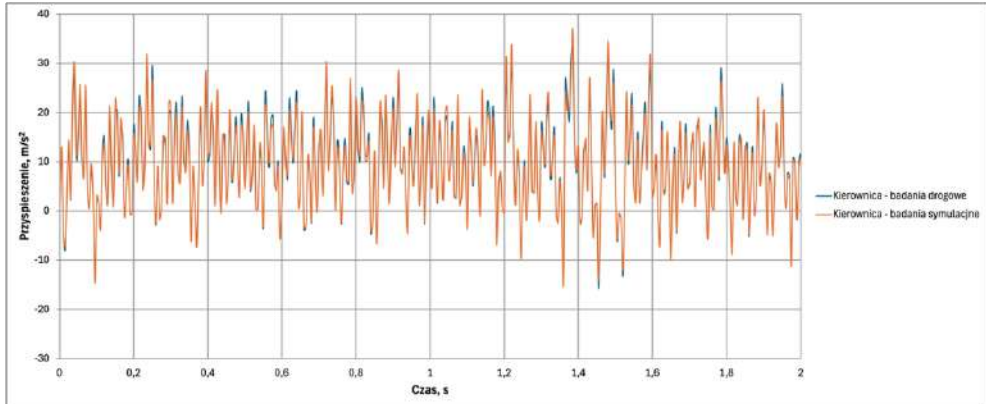
Dla nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym zarejestrowane przyspieszenia wejściowe charakteryzowały się większą amplitudą oraz wyraźnie bardziej nieregularnym przebiegiem w czasie, co przedstawiono na rysunku 10.15. Taki charakter wymuszeń jest typowy dla nawierzchni zdegradowanych i powoduje zwiększone obciążenie dynamiczne zawieszenia motocykla.



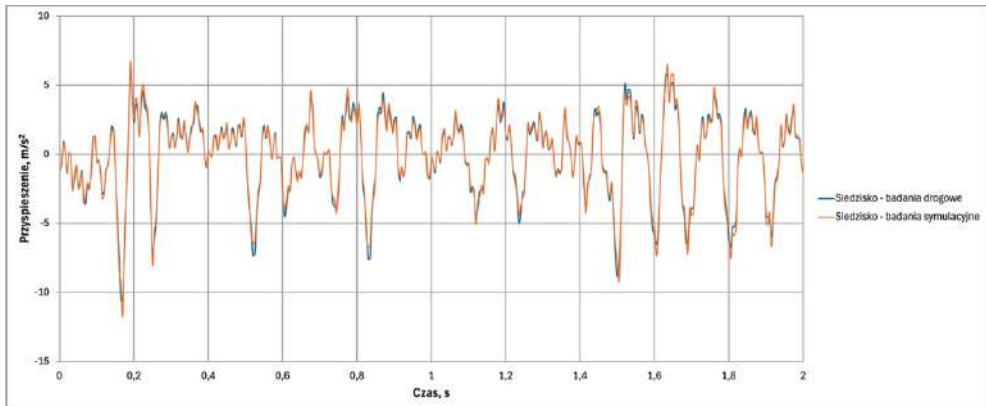
**Rys. 10.15** Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym

Porównanie wyników symulacji i pomiarów na kierownicy oraz siedzisku (rys. 10.16 i 10.17) wskazuje na zachowanie zgodności przebiegów czasowych, przy jednoczesnym wzroście amplitud drgań w stosunku do nawierzchni o dobrym stanie technicznym. Różnice pomiędzy wynikami symulacyjnymi i rzeczywistymi wynoszą odpowiednio około 10% dla

kierownicy oraz 12% dla siedziska, co potwierdza zdolność modelu do odwzorowania również trudniejszych warunków drogowych.



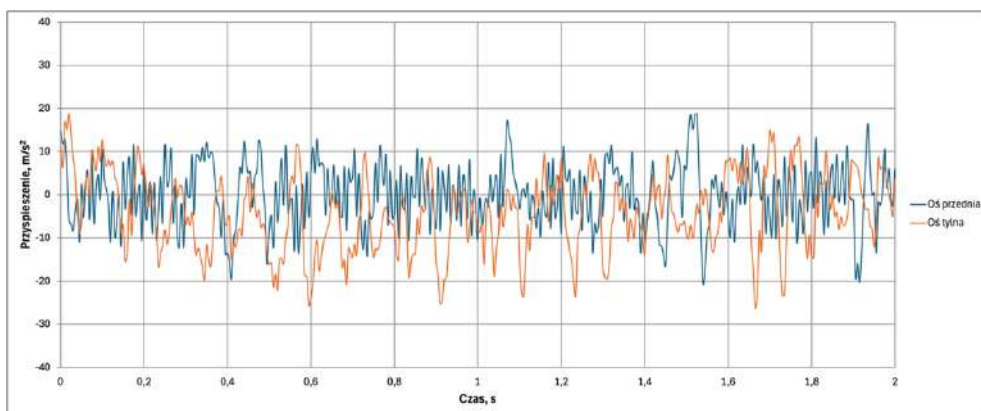
**Rys. 10.16** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o złym stanie technicznym



**Rys. 10.17** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o złym stanie technicznym

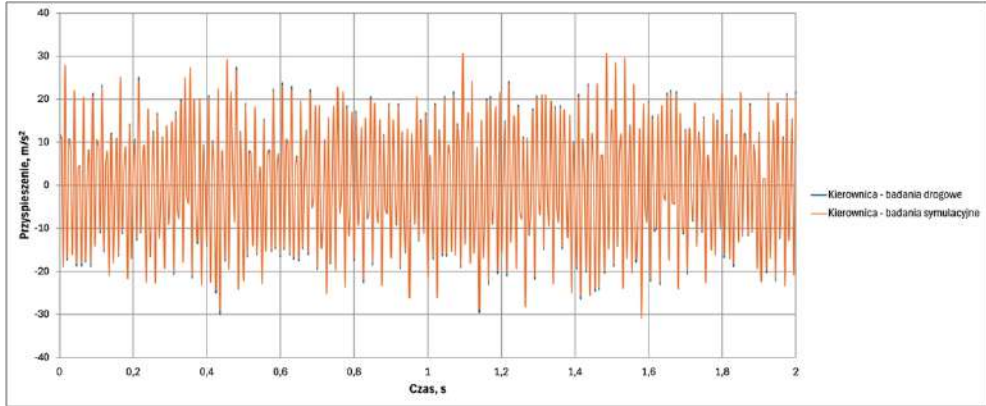
## Nawierzchnia z kostki brukowej – wyniki i walidacja

Nawierzchnia z kostki brukowej generuje wymuszenia o wyraźnej składowej okresowej, wynikającej z regularnej geometrii kostki. Przyspieszenia wejściowe zarejestrowane na osiach motocykla (rys. 10.18) charakteryzują się powtarzalnością oraz wyraźnym wzrostem energii drgań w określonych pasmach częstotliwości.

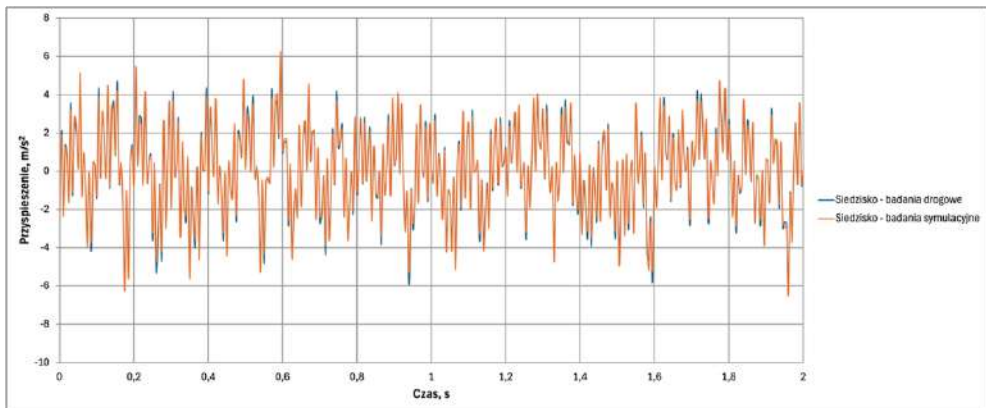


**Rys. 10.18** Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni z kostki brukowej

Porównanie wyników symulacji z pomiarami rzeczywistymi (rys. 10.19 i 10.20) wykazuje dobrą zgodność charakteru drgań, przy czym różnice ilościowe wynoszą około 3% dla kierownicy oraz 11% dla siedziska. Zwiększony błąd w przypadku siedziska wynika z większego udziału drgań przenoszonych przez tylny układ zawieszenia, silnie obciążony podczas przejazdu po tego typu nawierzchni.



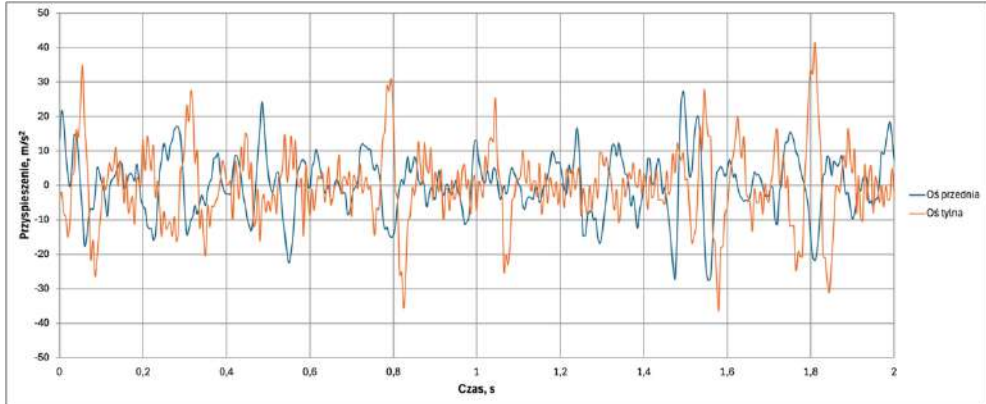
**Rys. 10.19** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z kostki brukowej



**Rys. 10.20** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z kostki brukowej

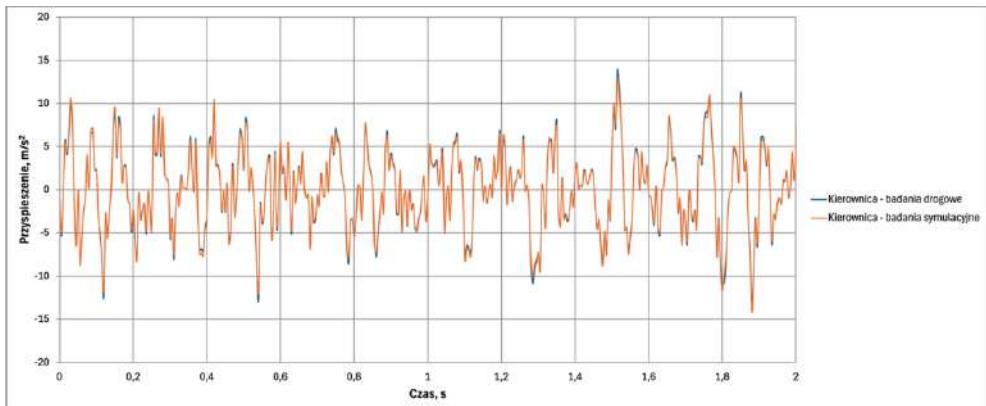
## Prefabrykowane płyty betonowe – wyniki i walidacja

Przejazd po nawierzchni z prefabrykowanych płyt betonowych charakteryzuje się występowaniem krótkotrwałych impulsów związanych z łączeniami płyt. Przyspieszenia wejściowe (rys. 10.21) wykazują wyraźne zmiany amplitudy oraz lokalne piki, które stanowią istotne wyzwanie dla modelowania numerycznego.

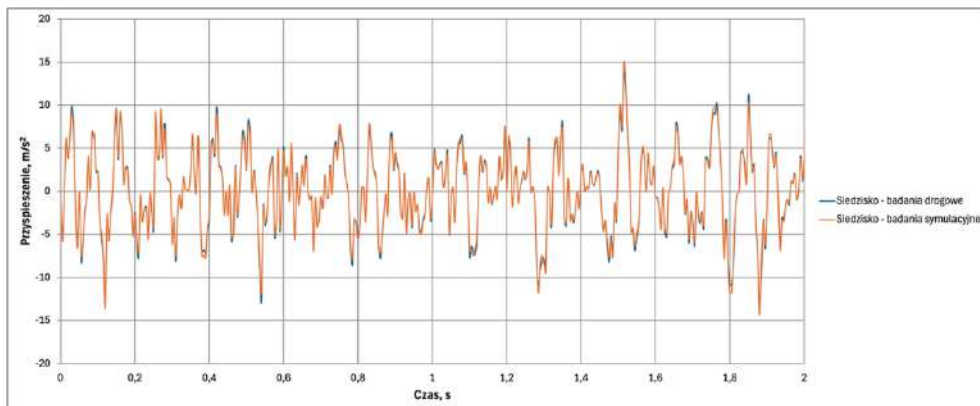


**Rys. 10.21** Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni z prefabrykowanych płyt betonowych

Porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi na kierownicy i siedzisku (rys. 10.22 i 10.23) wskazuje na dobrą zgodność czasową oraz akceptowalne różnice amplitudowe. Błąd względny wynosi odpowiednio około 7% dla kierownicy oraz 8% dla siedziska, co potwierdza poprawność modelu również w przypadku wymuszeń o charakterze impulsowym.



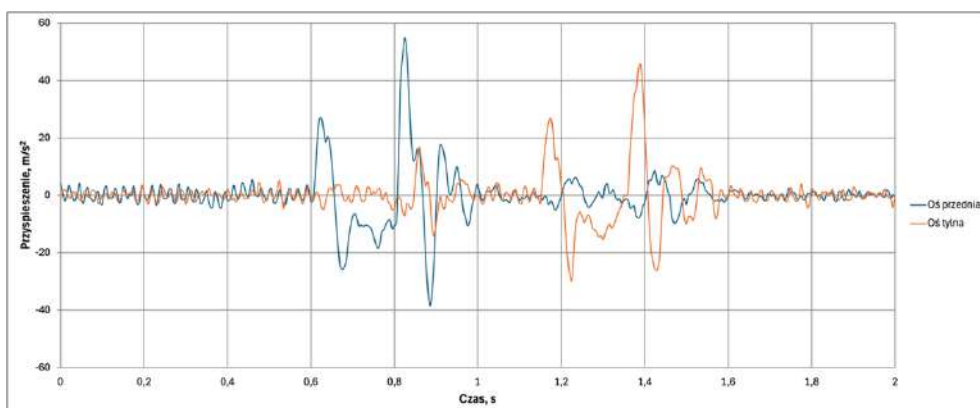
**Rys. 10.22** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z prefabrykowanych płyt betonowych



**Rys. 10.23** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z prefabrykowanych płyt betonowych

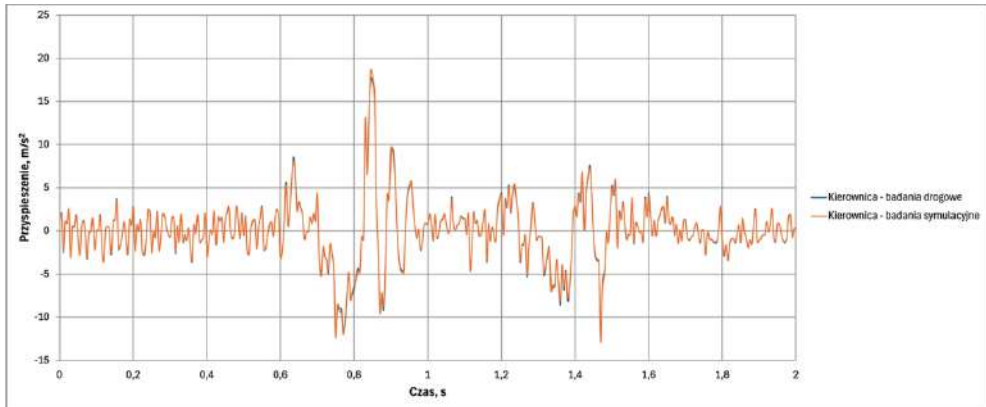
### Próg podrzutowy – wyniki i walidacja

Próg podrzutowy generuje silne, krótkotrwałe wymuszenia o charakterze udarowym. Przyspieszenia wejściowe zarejestrowane na osi przedniej i tylnej (rys. 10.24) charakteryzują się wysokimi wartościami ekstremalnymi oraz wyraźnym przesunięciem czasowym pomiędzy reakcją osi przedniej i tylnej.

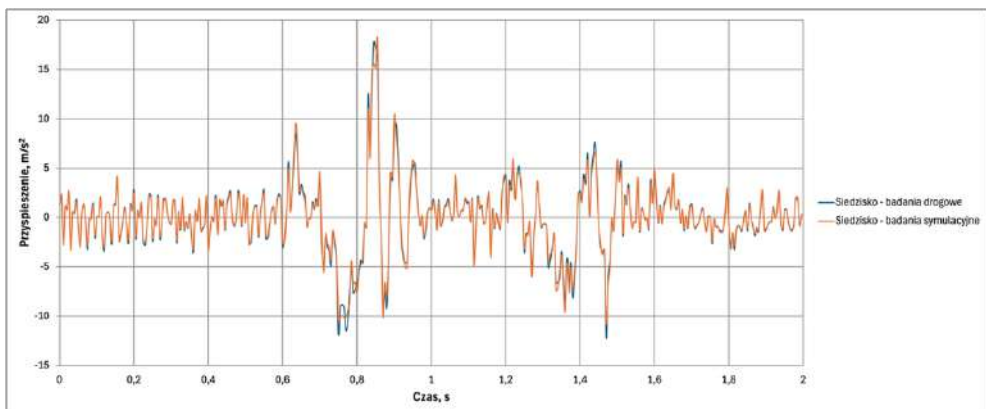


**Rys. 10.24** Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni z progiem podrzutowym

Porównanie odpowiedzi symulacyjnej i rzeczywistej (rys. 10.25 i 10.26) wykazuje bardzo dobrą zgodność przebiegów w czasie, przy różnicach amplitud nieprzekraczających 5% dla kierownicy oraz 12% dla siedziska. Uzyskane wyniki potwierdzają zdolność modelu LS-DYNA do odwzorowania zjawisk uderowych istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa i komfortu motocyklisty.



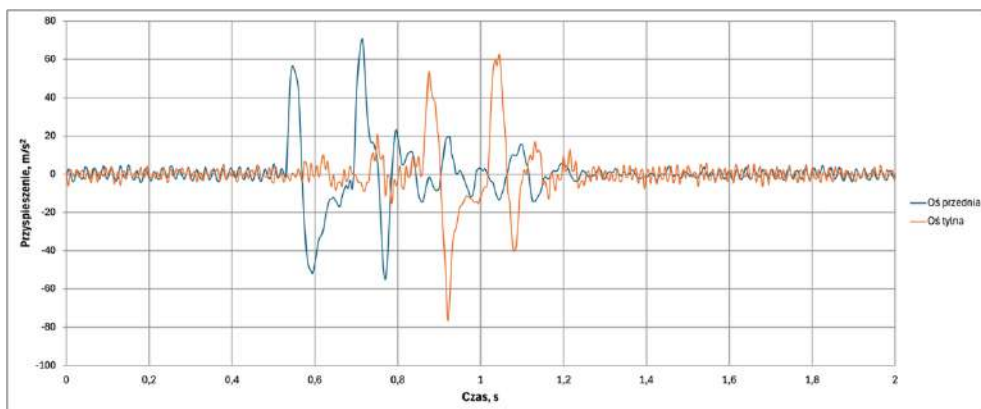
**Rys. 10.25** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem podrzutowym



**Rys. 10.26** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem podrzutowym

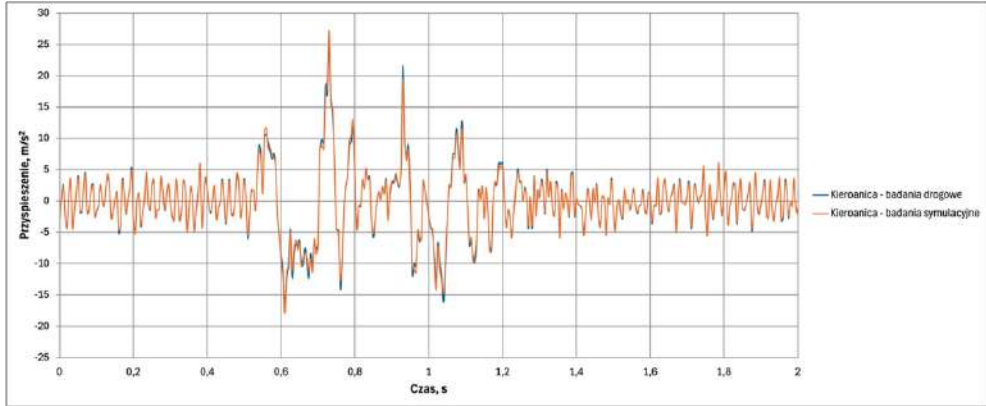
## Listwowy próg zwalniający – wyniki i walidacja

Listwowy próg zwalniający powoduje wystąpienie sekwencji impulsów o mniejszej amplitudzie, lecz większej częstotliwości występowania. Przyspieszenia wejściowe (rys. 10.27) odzwierciedlają charakter wymuszeń wynikający z geometrii progu oraz prędkości przejazdu.

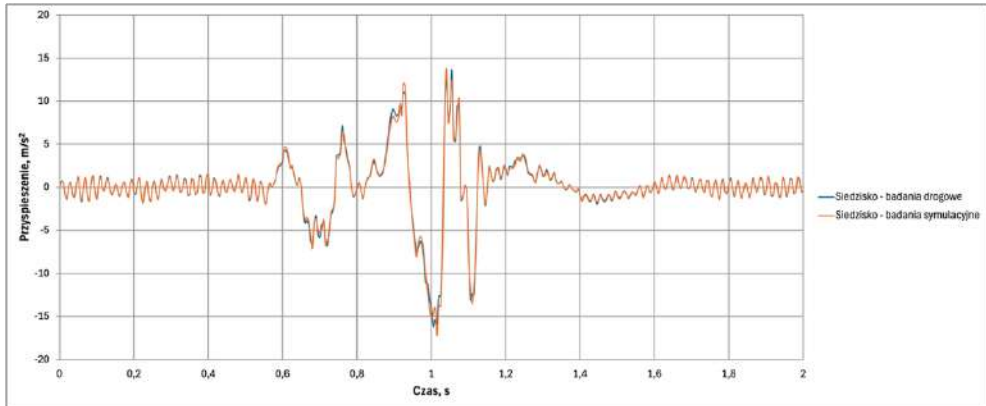


**Rys. 10.27** Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla odcinka z progiem zwalniającym

Porównanie wyników symulacji i pomiarów (rys. 10.28 i 10.29) wskazuje na zachowanie zgodności zarówno w zakresie kształtu przebiegów, jak i wartości ekstremalnych. Różnice ilościowe wynoszą około 10% dla kierownicy oraz 9% dla siedziska.



**Rys. 10.28** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem zwalniającym



**Rys. 10.29** Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem zwalniającym

Zestawienie błędów względnych dla wszystkich analizowanych nawierzchni przedstawiono w tabeli 10.1.

**Tabela 10.1** Błąd względny pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów dla poszczególnych nawierzchni

Nawierzchnia	Badania symulacyjne	
	Kierownica	Siedzisko
<b>Droga z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym</b>	8%	5%
<b>Droga z nawierzchnią o złym stanie technicznym</b>	10%	12%
<b>Droga z kostki brukowej</b>	3%	11%
<b>Droga z prefabrykowanych płyt betonowych</b>	7%	8%
<b>Droga z progiem podrzutowym do 10 km/h</b>	5%	12%
<b>Droga z listwowym progiem zwalniającym do 20 km/h</b>	10%	9%

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że opracowany model numeryczny motocykla Yamaha XV 125 umożliwia wiarygodne odwzorowanie zjawisk dynamicznych związanych z oddziaływaniem drgań na motocyklistę. Uzyskana zgodność wyników symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi, przy błędzie względnym nieprzekraczającym 12%, potwierdza poprawność przyjętych założeń modelowych oraz przydatność modelu do analizy wpływu różnych nawierzchni drogowych na poziom drgań rejestrowanych na kierownicy i siedzisku.

Uzyskany poziom zgodności, przy błędach mieszczących się w zakresie od 3% do 12%, należy uznać za wystarczający do prowadzenia analiz porównawczych oraz oceny wpływu zmian warunków drogowych

na odpowiedź dynamiczną motocykla. Taka dokładność modelu pozwala na jego wykorzystanie w badaniach optymalizacyjnych i interpretacyjnych, mimo że nie eliminuje całkowicie wpływu uproszczeń przyjętych na etapie modelowania.

Największą zgodność pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów uzyskano dla nawierzchni o bardziej regularnym charakterze wymuszeń, natomiast większe rozbieżności występowały w przypadkach związanych z wymuszeniami impulsowymi oraz bardziej złożoną transmisją drgań przez tylne zawieszenie. Szczególnie widoczne było to w wynikach dla siedziska, gdzie błędy względne osiągały większe wartości niż dla kierownicy. Może to wynikać z bardziej złożonego charakteru przenoszenia drgań przez tylny układ zawieszenia oraz z uproszczeń przyjętych w modelu numerycznym.

Zastosowana metodyka modelowania i walidacji potwierdziła, że model LS-DYNA może być wykorzystywany jako narzędzie wspomagające analizę komfortu wibracyjnego motocyklisty oraz ocenę wpływu zmian konstrukcyjnych na poziom drgań. Jednocześnie należy podkreślić, że model ma charakter uproszczony, a jego dalszy rozwój powinien obejmować bardziej zaawansowane odwzorowanie kontaktu z nawierzchnią oraz rozszerzenie analizy o dodatkowe aspekty biomechaniczne oddziaływania drgań na człowieka.



## Podsumowanie i wnioski

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej była analiza drgań oddziałujących na motocyklistę podczas jazdy, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na komfort oraz bezpieczeństwo kierowcy. W pracy przyjęto kompleksowe podejście badawcze, obejmujące studium literaturowe, badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych, badania stanowiskowe, analizę skuteczności modyfikacji zawieszenia oraz manetek kierownicy, a także modelowanie i analizy numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania LS-DYNA. Tak przyjęty zakres badań umożliwił ocenę zjawiska drgań zarówno w warunkach eksploatacyjnych, jak i laboratoryjnych oraz symulacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że cele pracy zostały zrealizowane. Cel teoretyczny osiągnięto poprzez opracowanie i weryfikację modelu numerycznego motocykla Yamaha XV 125, umożliwiającego analizę zjawisk dynamicznych związanych z oddziaływaniem drgań na motocyklistę. Cel praktyczny zrealizowano poprzez opracowanie metodyki pomiaru drgań w warunkach rzeczywistych, odwzorowanie wymuszeń drogowych na stanowisku badawczym oraz wskazanie rozwiązań konstrukcyjnych ograniczających poziom drgań przenoszonych na kierowcę.

Uzyskane wyniki wykazały, że poziom drgań oddziałujących na motocyklistę jest silnie zależny od rodzaju nawierzchni drogowej. Najbardziej niekorzystne warunki występowały dla nawierzchni o dużej nierówności i charakterze impulsowym, takich jak kostka brukowa,

prefabrykowane płyty betonowe oraz progi zwalniające, natomiast najkorzystniejsze warunki obserwowano dla nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym. Oznacza to, że rodzaj nawierzchni stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na poziom obciążenia wibracyjnego motocyklisty.

Stwierdzono również, że w analizowanych przypadkach istotne znaczenie miały drgania przenoszone zarówno na kierownicę, jak i na siedzisko motocykla, co potwierdza konieczność równoczesnej oceny oddziaływań miejscowych i ogólnych. Uzyskane wyniki wskazują, że ocena komfortu i bezpieczeństwa motocyklisty wymaga analizy całego układu człowiek–motocykl–nawierzchnia, a nie jedynie pojedynczego elementu konstrukcyjnego lub jednego miejsca pomiarowego.

W ramach pracy wykonano łącznie 132 eksperymenty obejmujące 22 konfiguracje motocykla, uwzględniające trzy warianty zawieszenia tylnego, dziewięć wariantów zawieszenia przedniego oraz dziesięć wariantów manetek, analizowanych w sześciu scenariuszach nawierzchniowych. Tak zgromadzony materiał badawczy pozwolił na kompleksową ocenę wpływu poszczególnych modyfikacji na poziom drgań oddziałujących na motocyklistę oraz na sformułowanie wniosków o charakterze zarówno poznawczym, jak i praktycznym.

Wykazano, że modyfikacje zawieszenia oraz manetek kierownicy wpływają istotnie na ograniczenie poziomu drgań przenoszonych na kierowcę. Stopień redukcji drgań określano na podstawie względnej zmiany wartości skutecznej RMS przyspieszeń w odniesieniu do konfiguracji bazowej motocykla, a dla zwiększenia wiarygodności wyników każdą konfigurację badano trzykrotnie i uśredniano otrzymane wartości. Uzyskane

rezultaty potwierdziły, że odpowiedni dobór parametrów zawieszenia oraz właściwości elementów kontaktowych może prowadzić do mierzalnej poprawy komfortu jazdy.

Przeprowadzone analizy wykazały, że dla pojedynczych modyfikacji uzyskano redukcję drgań wynoszącą maksymalnie do 13% dla zawieszenia tylnego, do 12% dla zawieszenia przedniego oraz do 9% dla manetek kierownicy, przy czym wielkość efektu zależała od rodzaju nawierzchni. Najkorzystniejsze rezultaty obserwowano zwłaszcza dla nawierzchni o większej nierówności, gdzie wpływ odpowiedniego doboru parametrów zawieszenia był najbardziej wyraźny. Najlepsze efekty uzyskano przy zastosowaniu tylnego zawieszenia o niskim ciśnieniu roboczym, przedniego zawieszenia z odpowiednio dobranym tłumieniem odbicia oraz miękkich manetek silikonowych o niskiej twardości.

Należy jednak podkreślić, że wartości redukcji uzyskane dla poszczególnych modyfikacji odnoszą się do oddzielnego wpływu pojedynczych zmian konstrukcyjnych i nie powinny być sumowane. Oddziaływania pomiędzy elementami układu mają bowiem charakter nieliniowy i wzajemnie zależny, dlatego końcowa ocena skuteczności zastosowanych rozwiązań wymaga ostrożnej interpretacji oraz odniesienia do rzeczywistości przebadanych konfiguracji.

Opracowane stanowisko laboratoryjne umożliwiło odwzorowanie wymuszeń drogowych zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych oraz przeprowadzenie badań w warunkach kontrolowanych i powtarzalnych. Potwierdzono tym samym, że badania stanowiskowe mogą stanowić skuteczne uzupełnienie badań drogowych, szczególnie w analizach porównawczych oraz podczas oceny wpływu zmian konstrukcyjnych na

poziom drgań. Stanowisko to może być traktowane jako wartościowe narzędzie wspomagające dalsze badania eksperymentalne.

Istotnym rezultatem pracy było również opracowanie modelu numerycznego motocykla Yamaha XV 125, umożliwiającego wiarygodne odwzorowanie zjawisk dynamicznych związanych z oddziaływaniem drgań na motocyklistę. Walidacja modelu, przeprowadzona na podstawie porównania wyników symulacji i badań drogowych, wykazała błąd względny nieprzekraczający 12% dla wszystkich analizowanych nawierzchni. Uzyskana zgodność wyników symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi potwierdza poprawność przyjętych założeń modelowych oraz przydatność modelu LS-DYNA do analiz wpływu rodzaju nawierzchni drogowej na poziom drgań rejestrowanych na kierownicy i siedzisku motocykla.

Wyniki pracy posiadają zarówno wartość poznawczą, jak i aplikacyjną. Opracowana metodyka badawcza, stanowisko laboratoryjne oraz zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne mogą zostać wykorzystane w dalszych pracach badawczo-rozwojowych nad poprawą komfortu jazdy, ograniczeniem negatywnych skutków zdrowotnych długotrwałej ekspozycji na drgania oraz doskonaleniem konstrukcji motocykli. Uzyskane rezultaty mogą również stanowić wsparcie dla producentów pojazdów, projektantów układów zawieszenia oraz inżynierów zajmujących się infrastrukturą drogową.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że ograniczenie drgań oddziałujących na motocyklistę jest możliwe poprzez odpowiedni dobór parametrów zawieszenia oraz właściwości elementów kontaktowych, a połączenie badań rzeczywistych, stanowiskowych i numerycznych stanowi spójne i skuteczne podejście do analizy komfortu oraz bezpieczeństwa

użytkowania motocykla. Przedstawione w rozprawie rozwiązania stanowią podstawę do dalszego rozwijania metod oceny i ograniczania drgań w pojazdach motocyklowych.



## Kierunki dalszych badań

Możliwe kierunki dalszych badań podsumowano w formie następujących punktów:

1. Rozszerzenie badań na różne typy motocykli, w tym sportowe, turystyczne, miejskie oraz terenowe, w celu uwzględnienia odmiennych geometrii ramy, ustawień zawieszenia oraz charakterystyk dynamicznych, które wpływają na sposób propagacji drgań i ich odczuwalność przez kierowcę.
2. Zwiększenie różnorodności testowanych nawierzchni drogowych, z uwzględnieniem warunków rzeczywistych takich jak mokra nawierzchnia, szutry, co umożliwi pełniejszą ocenę skuteczności układów tłumienia drgań w złożonym środowisku eksploatacyjnym.
3. Rozbudowa stanowiska badawczego o nowe możliwości, takie jak:
  - rejestracja reakcji fizjologicznych kierowcy (np. zmęczenie mięśni, zmiany tętna),
  - integracja z systemami VR/AR dla realistycznego odwzorowania wrażeń z jazdy.
4. Dalsze dopracowywanie modelu numerycznego motocykla, w tym:
  - uwzględnienie bardziej złożonego modelu motocykla,
  - implementacja wpływu zmiennego obciążenia dynamicznego i mas kierowcy.
5. Zintegrowanie badań rejestrowanych na bieżąco podczas codziennego użytkowania motocykli, np. poprzez wykorzystanie rejestratorów danych z motocykli użytkowanych codziennie (data logging), co pozwoli

uzupełnić analizę o perspektywę długoterminową, a tym samym dokładniej ocenić działanie układów w realnym środowisku.

6. Zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych i sztucznej inteligencji w celu automatycznego doboru ustawień zawieszenia i tłumienia w czasie rzeczywistym – zależnie od rodzaju nawierzchni i stylu jazdy kierowcy (np. poprzez analizę danych z czujników w czasie rzeczywistym).
7. Opracowanie uniwersalnego wskaźnika komfortu drganiowego dla motocykli, integrującego różne osie drgań, zakresy częstotliwości oraz lokalizacje pomiarowe (np. siedzisko, manetki, podnóżki) w jeden standardowy parametr oceny użytkowej.

## Bibliografia

- [1] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, 1992.
- [2] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3. wyd. Elsevier, 2012.
- [3] R. Dmowski, *Poradnik motocyklisty*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2009.
- [4] Z. Klimecki, *Motocykle*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1974.
- [5] „BMW - Rozwiązania konstrukcyjne”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.bmw-motorrad.pl/pl/home.html>
- [6] „Świat Motocykli - Rozwiązania konstrukcyjne”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://swiatmotocykli.pl/>
- [7] „KTM - Rozwiązania konstrukcyjne”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.ktm.com/pl-pl/error-pages/404.html>
- [8] „Kawasaki - Rozwiązania konstrukcyjne”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <http://www.kawasaki.pl/pl/products>
- [9] G. Cocco, *Motorcycle Design and Technology*. Giorgio Nada Editore, 2005.
- [10] T. Foale, *Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science*. Tony Foale, 2006.
- [11] M. Guiggiani, *The Science of Vehicle Dynamics: Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*. Springer, 2014.
- [12] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2. wyd. Springer, 2012.
- [13] „Motogen - Wahacz pchany przedniego zawieszenia”, Motogen.pl - motocykle, porady, testy. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://motogen.pl/>
- [14] „Scooter Central - Wahacz wleczony przedniego zawieszenia”, Scooter Central. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.scootercentral.com.au/>
- [15] „PulpMX - System Full Floster”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://pulpmx.com/>
- [16] „Motofaktor - System Pro-Link”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.motofaktor.pl/>
- [17] K. V. Mangaraju, V. Yogaraja, M. Karthik, B. K. Dora, R. Babu, i R. Venkatesan, „Kinematic and Dynamic Analysis of Monoshock Rear Suspension”, w *SAE Technical Paper*, 2004. doi: 10.4271/2004-32-0020.
- [18] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 6. wyd. Pearson, 2018.

- [19] S. H. Black i D. L. Taylor, „Simulation of Off-Road Motorcycle Ride Dynamics”, w *SAE Technical Paper*, 1979. doi: 10.4271/790261.
- [20] A. Błażejowski i S. Głowiński, „Stanowisko do określania właściwości lepko-sprężystych i dynamicznych charakterystyk elementów zawieszenia pojazdu”, *Autobusy Tech. Eksploat. Syst. Transp.*, t. 18, nr 6, s. 547–550, CD, 2017.
- [21] „Dulnvxiers - Zawieszenie przednie teleskopowe”. [Online]. Dostępne na: [www.dulnvxiers.tk](http://www.dulnvxiers.tk)
- [22] na bazie IdoSell ([www.idosell.com/shop](http://www.idosell.com/shop)), „MTS Technik - Sprężyny o charakterystyce progresywnej”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://mtstechnik.com/>
- [23] „Ohlins - Sprężyny o charakterystyce liniowej”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://ohlins.pl/>
- [24] A. Błażejowski i S. Jędrzejczyk, „Stanowisko do badania elementów zawieszenia pojazdów jednośladowych”, *TTS Tech. Transp. Szyn.*, t. R. 22, nr 12, 2015, Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-b7b7c166-dd20-4451-80fd-724a970f248c>
- [25] „Zedling Suspension - Zespół sprężysto tłumiący z amortyzatorem gazowo-olejowym”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.zedlingsuspension.com/>
- [26] C. Chavan, D. KB, R. Babu, i M. A. S. Shaikh, „Ride Comfort Analysis of Motorcycle Using Virtual Prototype”, w *SAE Technical Paper*, 2011. doi: 10.4271/2011-32-0537.
- [27] N. J. Mansfield, *Human Response to Vibration*. CRC Press, 2004. doi: 10.1201/b12481.
- [28] D. G. Wilder, „The Biomechanics of Vibration and Low Back Pain”, *Am. J. Ind. Med.*, t. 23, nr 4, s. 577–588, 1993, doi: 10.1002/ajim.4700230406.
- [29] V. Cossalter, *Motorcycle Dynamics*. Lulu.com, 2006.
- [30] book-info com – S. Hendel, *Motorcycle Design and Technology Handbook – Motorbooks Workshop [Motorbooks]*. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.book-info.com/isbn/0-7603-1990-1.htm>
- [31] A. Israr, H. Z. Tan, J. Mynderse, i G. T.-C. Chiu, „A Psychophysical Model of Motorcycle Handlebar Vibrations”, zaprezentowano na ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, maj 2009, s. 1233–1239. doi: 10.1115/IMECE2007-41504.

- [32] R. Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines*. Bloomsbury Publishing, 2012.
- [33] D. Bies, C. Hansen, i C. Howard, *Engineering Noise Control, Fifth Edition*. 2017.
- [34] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Mcgraw Hill Book Co, 2018.
- [35] Z. J. Sroka, „Wybrane zagadnienia teorii tłokowych silników spalinowych w aspekcie zmian objętości skokowej”, *Pr. Nauk. Inst. Konstr. Eksploat. Masz. Politech. Wroc. Monogr.*, t. Vol. 92, nr nr 35, 2013, Dostęp: 20 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-a709cee9-ce7c-4b2d-a66f-0ca219aa8286>
- [36] S. Segla i S. Roy, „Dynamic Simulation Analysis of a Motorcycle Suspension System - Assessment of Comfort”, *Manuf. Technol.*, t. 20, s. 373–377, wrz. 2020, doi: 10.21062/mft.2020.052.
- [37] V. Vasudevan i T. Patel, „Comparison of Discomfort Caused by Speed Humps on Bicyclists and Riders of Motorized Two-Wheelers”, *Sustain. Cities Soc.*, t. 35, s. 669–676, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.08.032.
- [38] M. J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*. Academic Press, 2012.
- [39] E. Łastowiecka-Moras, „Skutki zdrowotne narażenia pracowników na drgania mechaniczne przenoszone przez kończyny górne”, *Bezp. Pr. Nauka Prakt.*, t. nr 10, s. 18–21, 2020, doi: 10.5604/01.3001.0014.4472.
- [40] „Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy”. [Online]. Dostępne na: [www.archiwum.ciop.pl](http://www.archiwum.ciop.pl)
- [41] R. S. Sharp, S. Evangelou, i D. J. N. Limebeer, „Advances in the Modelling of Motorcycle Dynamics”, *Multibody Syst. Dyn.*, t. 12, nr 3, s. 251–283, 2004, doi: 10.1023/B:MUBO.0000049195.60868.a2.
- [42] M. Bovenzi, „Health Risks from Occupational Exposures to Mechanical Vibration”, *Med. Lav.*, t. 97, nr 3, s. 535–541, 2006.
- [43] Z. Engel, *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydanie drugie poprawione i Uaktualnione. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001.
- [44] E. Kardas-Cinal, „Metody oceny komfortu wibracyjnego w środkach transportu”, *Pr. Nauk. Politech. Warsz. Transp.*, t. z. 112, 2016, Dostęp: 20 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-5b68e523-dd59-4412-bbd6-d308a1280441>

- [45] H. Ospina-Mateus, L. A. Quintana Jiménez, F. J. López-Valdes, i K. Salas-Navarro, „Understanding the impact of physical fatigue and postural discomfort experienced during motorcycling: A systematic review”, *J. Transp. Health*, t. 12, s. 290–318, 2019, doi: 10.1016/j.jth.2019.01.001.
- [46] P. Torrado, M. Marina, S. Baudry, i M. R’ios, „Muscle Fatigue When Riding a Motorcycle: A Case Study”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, t. 18, nr 15, s. 7738, 2021, doi: 10.3390/ijerph18157738.
- [47] X. Zhao i C. Schindler, „Evaluation of whole-body vibration exposure experienced by operators of a compact wheel loader according to ISO 2631-1:1997 and ISO 2631-5:2004”, *Int. J. Ind. Ergon.*, t. 44, nr 6, s. 840–850, lis. 2014, doi: 10.1016/j.ergon.2014.09.006.
- [48] *PN-EN ISO 5349-2:2004/A1 Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 2: Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy.*
- [49] M. Nader, „Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka”, *Pr. Nauk. Politech. Warsz. Transp.*, t. z. 46, s. 3–172, 2001.
- [50] M. Nader i J. Korzeb, „Przegląd Biomechanicznych Modeli do Oceny Oddziaływania Drgań na Organizm Ludzki”, zaprezentowano na Materiały III Krajowego Sympozjum, Komputerowe Systemy Wspomagania Prac Inżynierskich w Przemysle i Transporcie, 2015.
- [51] Marek Cierpień-Wolan, „Rocznik Statystyczny Pracy 2025”, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2025.
- [52] „BardoMed - Zmiany powstałe w układzie krążenia krwi”. [Online]. Dostępne na: [www.bardomed.pl](http://www.bardomed.pl)
- [53] „Fizjoplaner - Zmiany powstałe w układzie kostno-stawowym”. [Online]. Dostępne na: [www.fizjoplaner.pl](http://www.fizjoplaner.pl)
- [54] A. Bhuvendran i A. Prabhakaran, „Performance Evaluation of Air Cushioned Seat in a Motorcycle”, *Mater. Today Proc.*, t. 21, s. 648–651, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.395.
- [55] V. Balasubramanian i M. Jagannath, „Detecting Motorcycle Rider Local Physical Fatigue and Discomfort Using Surface Electromyography and Seat Interface Pressure”, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, t. 22, s. 150–158, 2014, doi: 10.1016/j.trf.2013.12.010.
- [56] G. S. Paddan i M. J. Griffin, „Evaluation of Whole-Body Vibration in Vehicles”, *J. Sound Vib.*, t. 253, nr 1, s. 195–213, 2002, doi: 10.1006/jsvi.2001.4256.

- [57] A. N. Rimell i N. J. Mansfield, „Design of Digital Filters for Frequency Weightings Required for Risk Assessments of Workers Exposed to Vibration”, *Ind. Health*, t. 45, nr 4, s. 512–519, 2007, doi: 10.2486/indhealth.45.512.
- [58] A. G. Piersol i T. L. Paez, Red., *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 6. wyd. McGraw-Hill, 2010.
- [59] *PN-EN ISO 5349-1:2004 Drgania mechaniczne - Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne - Część 1: Wymagania ogólne.*
- [60] *EN 14253:2003+A1:2007 Mechanical vibration - Measurement and calculation of occupational exposure to whole-body vibration with reference to health - Practical guidance EN 14253:2003+A1:2007.*
- [61] *ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements.*
- [62] M. J. Griffin, „A Comparison of Standardized Methods for Predicting the Hazards of Whole-Body Vibration and Repeated Shocks”, *J. Sound Vib.*, t. 215, nr 4, s. 883–914, 1998, doi: 10.1006/jsvi.1998.1600.
- [63] R. G. Dong, D. E. Welcome, i J. Z. Wu, „Frequency Weightings Based on Biodynamics of Fingers-Hand-Arm System”, *Ind. Health*, t. 43, nr 3, s. 516–526, 2005, doi: 10.2486/indhealth.43.516.
- [64] P. M. Pitts, M. Bovenzi, A. J. Brammer, H. Mason, K. Poole, i C. Young, „Relative Performance of Frequency Weighting W(h) and Alternative Frequency Weightings for Predicting the Incidence of Vibration-Induced White Finger”, *Ann. Occup. Hyg.*, t. 56, nr 7, s. 808–824, 2012, doi: 10.1093/annhyg/mes054.
- [65] *PN-EN 14253+A1:2011 Drgania mechaniczne - Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia - Wytyczne praktyczne.*
- [66] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 10 października 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. (Dz. U. 2005 Nr 212 poz. 1769, Dz.U. 2007.*
- [67] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne. (Dz. U. 2005 Nr 157 poz. 1318).*

- [68] M. Griffin, „Discomfort from feeling vehicle vibration”, *Veh. Syst. Dyn. - VEH SYST DYN*, t. 45, s. 679–698, lip. 2007, doi: 10.1080/00423110701422426.
- [69] G. S. Paddan i M. J. Griffin, „Effect of Seating on Exposures to Whole-Body Vibration in Vehicles”, *J. Sound Vib.*, t. 253, nr 1, s. 215–241, 2002, doi: 10.1006/jsvi.2001.4257.
- [70] H.-C. Chen, W.-C. Chen, Y.-P. Liu, C.-Y. Chen, i Y.-T. Pan, „Whole-body vibration exposure experienced by motorcycle riders – An evaluation according to ISO 2631-1 and ISO 2631-5 standards”, *Int. J. Ind. Ergon.*, t. 39, s. 708–718, wrz. 2009, doi: 10.1016/j.ergon.2009.05.002.
- [71] J. Noh, K. A. Md Rezali, A. As’array, i N. Jalil, „Transmission of Vibration from Motorcycle Handlebar to the Hand”, *J. Soc. Automot. Eng. Malays.*, t. 1, s. 191–197, wrz. 2017, doi: 10.56381/jsaem.v1i3.64.
- [72] P. Kowalski, „Pomiar i ocena drgań mechanicznych w środowisku pracy według nowych przepisów prawnych”, *Bezp. Pr. Nauka Prakt.*, t. nr 9, s. 24–26, 2006.
- [73] M. Picu i C. Picu, „A Study on the Exposure to Vibration of the Whole Body and the Hand-Arm Segment of Motorcyclists”, 2022, s. 159–170. doi: 10.1007/978-3-030-96787-1\_18.
- [74] D. Chindamo, M. Gadola, D. Armellin, i F. Marchesin, „BikeShake: the design of an indoor simulator dedicated to motorcycle ride testing as an interactive project”, *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, t. 12, lis. 2018, doi: 10.1007/s12008-017-0435-7.
- [75] M. Carratù, A. Pietrosanto, P. Sommella, i V. Paciello, „Smart Wearable Devices for Human Exposure Vibration Measurements on Two-Wheel Vehicles”, *Acta IMEKO*, t. 9, nr 4, s. 121–127, 2020, doi: 10.21014/acta\_imeko.v9i4.727.
- [76] B. Shivakumara i V. Sridhar, „Study of vibration and its effect on health of the motorcycle rider”, *Online J. Health Allied Sci.*, t. 9, kwi. 2010.
- [77] L. Roseiro, M. Neto, A. Amaro, C. Alcobia, i M. de F. Paulino, „Hand-arm and whole-body vibrations induced in cross motorcycle and bicycle drivers”, *Int. J. Ind. Ergon.*, t. 56, s. 150–160, lis. 2016, doi: 10.1016/j.ergon.2016.10.008.
- [78] M. Bovenzi, „A Longitudinal Study of Low Back Pain and Daily Vibration Exposure in Professional Drivers”, *Ind. Health*, t. 48, nr 5, s. 584–595, 2010, doi: 10.2486/indhealth.MSWBVI-02.

- [79] T. Figlus, P. Szafraniec, i T. Skrúčaný, „Methods of Measuring and Processing Signals during Tests of the Exposure of a Motorcycle Driver to Vibration and Noise”, *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, t. 16, nr 17, s. 3145, 2019, doi: 10.3390/ijerph16173145.
- [80] L. Picu, „A Study on the Exposure to Vibration of the Whole Body and the Hand-Arm Segment of Motorcyclists”, *Springer Proc. Phys.*, sty. 2022, doi: 10.1007/978-3-030-96787-1\_18.
- [81] R. Moreno, J. Cardona, P. Pintado, i J. M. Chicharro, „Predictors of whole body vibration exposure in motorcycle riders”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, s. 93–103, grudz. 2011, doi: 10.17533/udea.redin.13541.
- [82] R. S. Sharp i D. J. N. Limebeer, „A Motorcycle Model for Stability and Control Analysis”, *Multibody Syst. Dyn.*, t. 6, nr 2, s. 123–142, 2001, doi: 10.1023/A:1017508214101.
- [83] C. Spelta, S. M. Savaresi, i L. Fabbri, „Experimental Analysis of a Motorcycle Semi-Active Rear Suspension”, *Control Eng. Pract.*, t. 18, nr 11, s. 1239–1250, 2010, doi: 10.1016/j.conengprac.2010.04.006.
- [84] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, 5. wyd. Wiley, 2022.
- [85] P. García-Fernández, J. G. de Quevedo, C. Moreno-Ramírez, i A. F. del Rincón, „Simulation Tool for Motorbike Prototype Design”, w *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications*, t. 17, V. Petuya, C. Pinto, i E.-C. Lovasz, Red., w *Mechanisms and Machine Science*, vol. 17. , Springer, 2014, s. 17–24. doi: 10.1007/978-94-007-7485-8\_3.
- [86] Z. Xu, Z. Zhang, K. Zhou, C. Luo, i Z. Su, „Analysis and improvement of motorcycle vibration comfort”, t. 18, s. 3009–3013, grudz. 2007.
- [87] H. Erdelyi, M. Kirchner, S. Manzato, i S. Donders, „Multibody simulation with a virtual dummy for motorcycle vibration comfort assessment”, *Proc. ISMA 2012 Conf. Leuven Belg. Sept 17-19 2012*, paź. 2012.
- [88] Y. Feng i X. Jun, „Analysis of motorcycle vibration comfort based on rigid-flexible coupling model”, *Noise Vib. Worldw.*, t. 51, s. 110–115, cze. 2020, doi: 10.1177/0957456520923121.
- [89] „INOVA - Testing systems”. Dostęp: 19 maja 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.inova.cz/en/>
- [90] K. Podosek, Ž. Šarić, i A. Zuska, „Test bench for the assessment of vibrations occurring in motorcycles”, *Arch. Motoryz.*, t. 95, nr 1, s. 65–78, mar. 2022, doi: 10.14669/AM.VOL95.ART5.

- [91] A. V. Oppenheim i R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3. wyd. Pearson, 2009.
- [92] J. S. Bendat i A. G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 4. wyd. Wiley, 2010.
- [93] D. E. Newland, *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*, 3. wyd. Dover Publications, 2005.
- [94] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2. wyd. Research Studies Press, 2000.
- [95] R. R. C. Jr i A. J. Kurdila, *Fundamentals of Structural Dynamics*, 2. wyd. Wiley, 2006.
- [96] A. Zuska, „Educational stand for presentation of the vibration propagation in the sitting human (vehicle driver) body”, *Gen. Prof. Educ.*, t. 2017, nr 4, s. 63–70, grudz. 2017.
- [97] T. Stańczyk i A. Zuska, „Stanowisko do symulacyjnych badań podukładu fotel-kierowca”, *Prace Naukowe Transport - Wydawnictwo Politechniki Radomskiej*, s. 149–158, 2005.
- [98] N. M. M. Maia i J. M. M. e Silva, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press, 1997.
- [99] J.-N. Juang, *Applied System Identification*. Prentice Hall, 1994.
- [100] P. Kurowski, *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018*. SDC Publications, 2018.
- [101] K.-J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2. wyd. Klaus-Jürgen Bathe, 2014.
- [102] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, i K. Elkhodary, *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, 2. wyd. Wiley, 2014.

## Spis tabel

<b>Tabela 2.1</b> Wybrane częstotliwości rezonansowe elementów ciała człowieka i potencjalne dysfunkcje [49] .....	33
<b>Tabela 3.1</b> Wartości dopuszczalne dla ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN) oraz wartości progów działania dla dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne [67] .....	46
<b>Tabela 3.2.</b> Wartości progów działania dla dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne [40].....	46
<b>Tabela 6.1</b> Wartość RMS dla kierownicy i siedziska na różnych nawierzchniach drogi .....	87
<b>Tabela 6.2</b> Wartość VDV dla kierownicy i siedziska na różnych nawierzchniach drogi .....	91
<b>Tabela 6.3</b> Wartość RMQ dla kierownicy i siedziska na różnych nawierzchniach drogi .....	95
<b>Tabela 7.1.</b> Dane techniczne pulsatorów elektrohydraulicznych MTS Model 244.12. ....	131
<b>Tabela 7.2</b> Parametry techniczne zespołu zasilania hydraulicznego Model Silent flow 505.20.....	135
<b>Tabela 8.1</b> Statystyczne parametry przyspieszeń drgań zarejestrowanych na osi przedniej tylnej motocykla, przetworzone w oprogramowaniu Moog Replication .....	145
<b>Tabela 8.2</b> Zestawienie statystycznych parametrów przyspieszeń drgań – porównanie wartości sygnału docelowego i odpowiedzi układu uzyskanej na stanowisku badawczym wraz z błędami procentowymi .....	162
<b>Tabela 8.3</b> Statystyczne parametry sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci w kolejnej iteracji procesu replikacji .....	163
<b>Tabela 8.4</b> Procentowy błąd minimalny i maksymalny uzyskany na stanowisku badawczym dla przedniej i tylnej osi motocykla dla sześciu rodzajów nawierzchni .....	166
<b>Tabela 9.1</b> Dobór modyfikacji zawieszenia i manetek motocykla w zależności od rodzaju nawierzchni oraz ich wpływ na redukcję drgań .....	177
<b>Tabela 10.1</b> Błąd względny pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów dla poszczególnych nawierzchni.....	216



## Spis rysunków

<b>Rys. 1.1</b> Klasyfikacja motocykli [5] .....	14
<b>Rys. 1.2</b> Rodzaje jednostek napędowych występujących w motocyklach [5], [6], [7].....	15
<b>Rys. 1.3</b> Elementy motocykla przenoszące drgania na kierowcę oraz pasażera [8].....	16
<b>Rys. 1.4</b> Elementy motocykla generujące oraz przenoszące drgania z nawierzchni drogi [8] .....	17
<b>Rys. 1.5</b> Motocykle z typowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi przedniego zawieszenia [8], [13], [14] .....	18
<b>Rys. 1.6</b> Rozwiązania stosowane w przednim zawieszeniu teleskopowym [8] .....	19
<b>Rys. 1.7</b> Rozwiązania konstrukcyjne tylnego zawieszania w motocyklach [5], [8], [15], [16].....	21
<b>Rys. 1.8</b> Budowa przedniego zawieszenia teleskopowego [21] .....	23
<b>Rys. 1.9</b> Typy sprężyn wykorzystywanych w motocyklach [22], [23] .....	24
<b>Rys. 1.10</b> Zespół sprężysto-tłumiący z amortyzatorem gazowo-olejowym [25] .....	25
<b>Rys. 2.1</b> Wybrane częstotliwości rezonansowe narządów i części ciała człowieka [50].....	33
<b>Rys. 2.2</b> Procentowy udział zatrudnionych w warunkach zagrożenia związanego ze środowiskiem pracy w 2025 r. [51] .....	34
<b>Rys. 2.3</b> Zmiany w układzie krążenia krwi palców [52] .....	35
<b>Rys. 2.4</b> Zmiany w układzie kostno-stawowym [53] .....	36
<b>Rys. 2.5</b> Wpływ drgań na organizm człowieka [43].....	37
<b>Rys. 3.1</b> Kierunek pomiaru drgań oddziałujących na kończyny górne [48]	40
<b>Rys. 3.2</b> Krzywa korekcyjna $W_h$ [59] .....	41
<b>Rys. 3.3</b> Kierunki pomiaru drgań ogólnych i oddziałujących na stopy [61]	43
<b>Rys. 3.4</b> Krzywe korekcyjne $W_d$ oraz $W_k$ [61] .....	44
<b>Rys. 4.1</b> Schemat symulatora BikeShake [74].....	62
<b>Rys. 4.2</b> Motocykl podczas badania na symulatorze BikeShake [74] .....	64
<b>Rys. 4.3</b> Stanowisko testowe firmy Inova GmbH [89].....	65
<b>Rys. 6.1</b> Widok pojazdu wykorzystanego w badaniach .....	76
<b>Rys. 6.2</b> Rozmieszczenie czujników przyspieszeń .....	77
<b>Rys. 6.3</b> Schemat układu pomiarowego.....	78
<b>Rys. 6.4</b> Zbiorcze zestawienie odcinków drogowych na których realizowane były badania: .....	79

<b>Rys. 6.5</b> Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.....	81
<b>Rys. 6.6</b> Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.....	82
<b>Rys. 6.7</b> Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h.....	83
<b>Rys. 6.8</b> Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h. ....	83
<b>Rys. 6.9</b> Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h.....	84
<b>Rys. 6.10</b> Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane na kierownicy i siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h.....	85
<b>Rys. 6.11</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h .....	99
<b>Rys. 6.12</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią o dobrym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.....	101
<b>Rys. 6.13</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.....	103
<b>Rys. 6.14</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym przy prędkości 50 km/h.....	105
<b>Rys. 6.15</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h .....	107
<b>Rys. 6.16</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z kostki brukowej przy prędkości 50 km/h .....	109

<b>Rys. 6.17</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h.....	111
<b>Rys. 6.18</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu drogą z nawierzchnią z prefabrykowanych płyt betonowych przy prędkości 20 km/h .....	113
<b>Rys. 6.19</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h.....	115
<b>Rys. 6.20</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg podrzutowy przy prędkości 10 km/h.....	117
<b>Rys. 6.21</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na kierownicy motocykla podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h .....	119
<b>Rys. 6.22</b> Widma amplitudowe przyspieszeń drgań zarejestrowanych w osiach X, Y i Z na siedzisku motocykla podczas przejazdu przez próg zwalniający listwowy przy prędkości 20 km/h .....	121
<b>Rys. 7.1</b> Stanowisko badawcze do symulacyjnych badań pojazdów jednośladowych.....	127
<b>Rys. 7.2</b> Układ wodząco–prowadzący umożliwiający montaż przedniego zawieszenia motocykla .....	128
<b>Rys. 7.3</b> Pulsator elektrohydrauliczny wraz z przegubem i płytą umożliwiającą montaż wahaczy motocyklowych.....	130
<b>Rys. 7.4</b> Rozdzielacz hydrauliczny .....	132
<b>Rys. 7.5</b> Zewnętrzna charakterystyka pulsatorów .....	133
<b>Rys. 7.6</b> Zespół zasilania hydraulicznego Model Silent flow 505.20.....	134
<b>Rys. 7.7</b> Stanowisko kontrolno-sterownicze z oprogramowaniem firmy MTS Series 793 Control Software oraz Moog Replication .....	136
<b>Rys. 8.1</b> Przykładowe czasowe przebiegi przyspieszeń drgań zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla podczas jazdy po drodze o złym stanie technicznym .....	143
<b>Rys. 8.2</b> Czasowe przebiegi sygnałów sterujących (drive) oraz odpowiadających im odpowiedzi dynamicznych (response) uzyskanych na stanowisku badawczym dla osi przedniej i tylnej motocykla .....	146

<b>Rys. 8.3</b> Gęstość widmowa mocy (PSD) sygnałów sterujących oraz porównanie odpowiedzi dynamicznej i odpowiedzi koherentnej układu dla kanałów 1 i 2 .....	148
<b>Rys. 8.4</b> Wartość funkcji spójności między sygnałem sterującym a odpowiedzią układu w poszczególnych pasmach częstotliwości dla osi przedniej i tylnej motocykla.....	150
<b>Rys. 8.5</b> Amplitudowe charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej (FRF) pomiędzy kanałami wejściowymi i wyjściowymi dla osi przedniej i tylnej motocykla.....	151
<b>Rys. 8.6</b> Porównanie sygnału docelowego i sygnału uzyskanego dla drogi o złym stanie technicznym w ostatniej iteracji procesu replikacji.....	153
<b>Rys. 8.7</b> Porównanie sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci w kolejnych iteracjach procesu replikacji dla dwóch kanałów pomiarowych.....	154
<b>Rys. 8.8</b> Porównanie widm częstotliwościowych przefiltrowanego sygnału docelowego oraz przefiltrowanego sygnału uzyskanego na stanowisku badawczym.....	156
<b>Rys. 8.9</b> Porównanie widm częstotliwościowych sygnału sterującego oraz jego zmodyfikowanej postaci w kolejnych iteracjach procesu replikacji..	157
<b>Rys. 8.10</b> Wykresy rozproszenia przefiltrowanych wartości sygnału docelowego i odpowiedzi układu dla kanałów 1 i 2 .....	159
<b>Rys. 8.11</b> Trend znormalizowanych wartości minimalnych, maksymalnych oraz RMS odpowiedzi układu w kolejnych iteracjach procesu replikacji .	160
<b>Rys. 9.1</b> Zmodyfikowane zawieszenie tylne w motocyklu Yamaha XV 125 .....	170
<b>Rys. 9.2</b> Zmodyfikowane zawieszenie przednie w motocyklu Yamaha XV 125 .....	171
<b>Rys. 9.3</b> Manetki wykonanych w technologii druku 3D .....	172
<b>Rys. 9.4</b> Manetki wykonane z ciekłej żywicy silikonowej.....	173
<b>Rys. 10.1</b> Model graficzny struktury ramy motocykla .....	184
<b>Rys. 10.2</b> Model graficzny struktury zawieszenia .....	185
<b>Rys. 10.3</b> Model graficzny struktury układu kierowniczego.....	186
<b>Rys. 10.4</b> Model graficzny struktury .....	187
<b>Rys. 10.5</b> Uproszczony model graficzny struktury motocykla Yamaha XV 125 .....	189
<b>Rys. 10.6</b> Model motocykla Yamaha XV 125 zaimportowany do środowiska LS-DYNA .....	191
<b>Rys. 10.7</b> Weryfikacja geometrii modelu w środowisku LS-DYNA .....	192

<b>Rys. 10.8</b> Wyznaczone środki ciężkości wybranych komponentów motocykla.....	193
<b>Rys. 10.9</b> Kontrola przekrojów elementów modelu .....	194
<b>Rys. 10.10</b> Siatka elementów skończonych (MES) modelu motocykla ....	196
<b>Rys. 10.11</b> Graficzne przedstawienie wyników symulacji .....	201
<b>Rys. 10.12</b> Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni asfaltowej o dobrym stanie technicznym.....	205
<b>Rys. 10.13</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o dobrym stanie technicznym.....	206
<b>Rys. 10.14</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o dobrym stanie technicznym .....	206
<b>Rys. 10.15</b> Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym .....	207
<b>Rys. 10.16</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o złym stanie technicznym .....	208
<b>Rys. 10.17</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia asfaltowa o złym stanie technicznym .....	208
<b>Rys. 10.18</b> Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni z kostki brukowej.....	209
<b>Rys. 10.19</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z kostki brukowej.....	210
<b>Rys. 10.20</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z kostki brukowej ...	210
<b>Rys. 10.21</b> Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni z prefabrykowanych płyt betonowych.....	211
<b>Rys. 10.22</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z prefabrykowanych płyt betonowych .....	211

<b>Rys. 10.23</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z prefabrykowanych płyt betonowych .....	212
<b>Rys. 10.24</b> Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla nawierzchni z progiem podrzutowym.....	212
<b>Rys. 10.25</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem podrzutowym.....	213
<b>Rys. 10.26</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem podrzutowym .....	213
<b>Rys. 10.27</b> Przyspieszenia wejściowe (kierunek pionowy) zarejestrowane na osi przedniej i tylnej motocykla – warunki brzegowe symulacji dla odcinka z progiem zwalniającym .....	214
<b>Rys. 10.28</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na kierownicy: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem zwalniającym.....	215
<b>Rys. 10.29</b> Porównanie przyspieszeń zarejestrowanych na siedzisku: badania drogowe oraz symulacja LS-DYNA – nawierzchnia z progiem zwalniającym .....	215