

# ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA BADAŃ STANOWISKOWYCH DO OCENY STABILNOŚCI POJAZDU JEDNOŚLADOWEGO

WITOLD GRZEGOŹEK<sup>1</sup>, KRZYSZTOF WEIGEL – MILLERET<sup>2</sup>

Politechnika Krakowska

## Streszczenie

Z doświadczeń wynika, że stateczność, stabilność (ang. stability), będąca jedną z ważniejszych właściwości pojazdów, rozumianą jako jego odporność na działanie zakłóceń czy zaburzeń w czasie ruchu prostoliniowego, powrotu do jazdy na wprost po wystąpieniu takiego zaburzenia a także wystąpienia niepożądanych form ruchu, zależy od wielu czynników. Realizacja badań drogowych motocykla niesie za sobą dużą dozę zagrożenia bezpieczeństwa dla kierującego oraz oprzyrządowania pomiarowego i archiwizującego, a istniejące proste modele matematyczne nie pozwalają na właściwą symulację tych form ruchu, stąd podjęto próbę wykonania badań wpływu niektórych parametrów kinematycznych przedniego zespołu motocykla na jego stabilność na specjalnie skonstruowanym bębnowym stanowisku badawczym. Badaniami objęto drgania typu wobble dla różnych prędkości i różnych kątów pochylecia przedniego widelca motocykla – przez co uzyskano zmianę długości odcinka wyprzedzenia. Praca zawiera opis zagadnień drganiowych występujących w pojazdach jednośladowych, opis wykonanego stanowiska badawczego a także metodykę i sposób przeprowadzenia badań oraz opis opracowanych wyników i opracowanych charakterystyk stabilności uzyskanych na stanowisku.

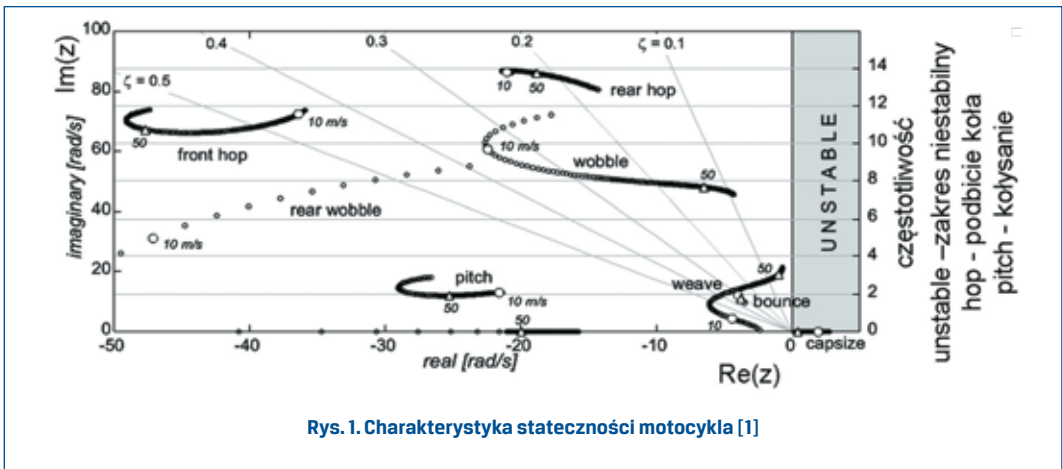
**Słowa kluczowe:** stabilność motocykla, testy stanowiskowe, wobble, dynamika motocykla

## 1. Wstęp

Przez stateczność ruchu motocykla rozumiemy odporność na działające zakłócenia ruchu oraz samopowracalność do jazdy na wprost po innym stanie ruchu. Najniebezpieczniejsze dla zachowania stateczności ruchu motocykla okazują się zjawiska o charakterze drganiowym ponieważ występują one nagle, w pewnych obszarach ruchu następuje ich samowzmocnienie, często powstają gdy kierowca planuje wykonanie manewru. Charakterystyki motocykla wyznaczone na podstawie badań przedstawiono na rysunku 1. Tłumienie dynamiczne, częstotliwości drganiowych form utraty stateczności zależą od prędkości jazdy. Dla badanego pojazdu niestabilny był tylko nieoscylacyjny przypadek przewrócenia motocykla.

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, witek@mech.pk.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Mechanika i Eksploatacja Maszyn, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, krzysztof.weigel.milleret@interia.pl



Rys. 1. Charakterystyka stateczności motocykla [1]

Z doświadczeń i badań teoretycznych wyznaczamy trzy charakterystyczne postaci utraty stateczności mogące w zależności od warunków występować pojedynczo lub równocześnie (poprzez sprzężenia).

### Przewrócenie (ang. capsizes)

Nieoscylacyjna postać utraty stateczności powodująca przewrócenie się pojazdu na bok (analogicznie do odwróconego wahadła). Motocykl stojący lub poruszający się prostoliniowo z niewielkimi prędkościami przewraca się. Wraz ze wzrostem prędkości jazdy niebezpieczeństwo przewrócenia się motocykla maleje. Ruch przewracający motocykl jest niezbędny do jego normalnego prowadzenia po łukach i kontrolowany przez kierowcę [9].

### Drgania Shimmy (trzeptanie ang. wobble)

Postać o charakterze oscylacyjnym występująca tylko gdy pojazd jest w ruchu. Polega na drganiach układu kierowniczego wraz z zawieszeniem wokół własnej osi. W ramie motocykla i całym tylnym zespole nie obserwujemy znacznych ruchów. Częstotliwości drgań leżą w zakresie 4–10 Hz. Ta postać drgań występuje przy większych prędkościach, powyżej prędkości charakterystycznej oscylacje mogą być samowzbudne. W konstrukcjach podatnych na drgania tej postaci stosowane są amortyzatory skrętu. Wraz ze wzrostem prędkości rośnie energia drgań i ich przyrost po czasie przez co stają się niebezpieczne.

### Kluczenie (ang. weave)

Są to oscylacje tylnego zespołu wokół główki ramy (odchylenie) sprzężone z oscylacjami przechyłu poprzecznego. Częstotliwość drgań 0,2 – 4 Hz. Postać ta może być niestabilna

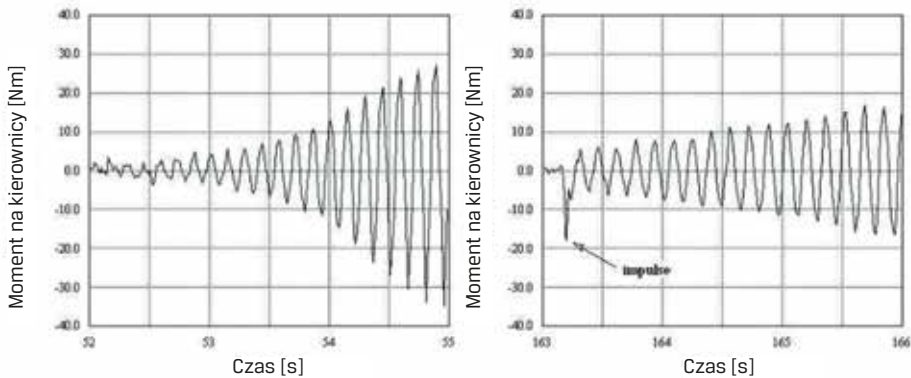
przy małych prędkościach jazdy, jednak ich niewielka energia pozwala kierowcy na ustabilizowanie ruchu. Przy większych prędkościach ryzyko wystąpienia tych drgań spada (rośnie energia potrzebna do ich wywołania) ale energia drgań rośnie przez co gdy już wystąpią kierowca nie może ich opanować.

Z powyższych wynika, że kierowca ma bardzo ograniczony wpływ na zachowanie pojazdu w rzeczywistych warunkach (na drodze) gdy motocykl wpadnie w drgania typu shimmy lub kluczenia, dlatego konstruktorzy powinni tak projektować pojazdy jednośladowe aby ryzyko wystąpienia tych niestabilności było jak najmniejsze. Jednak zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu zmniejszenie tendencji wpadania w drgania tych typów często powoduje zmniejszenie kierowności i pożądaných własności motocykla takich jak minimalny promień skrętu, moment przykładany na kierownicę.

Drgania typu wobble ze względu na konieczność uwzględnienia złożonego nieliniowego modelu opony [2] są trudne do ma-tematycznego opisanía, a istniejące modele są najczęściej mocno uproszczone. Dlatego dobrym rozwiązaniem są badania empiryczne. Drogowe badania motocykli zapewniają wyniki pozwalające na właściwą ocenę wpływu zmian parametrów motocykla na jego stabilność, jednak wprowadzanie dużych zakłóceń jest skrajnie niebezpieczne dla prowadzącego badania. Znacznie bezpieczniejszą formą badań zapewniającą wystarczającą zgodność z warunkami rzeczywistymi są badania stanowiskowe. Na stanowisku badawczym wyeliminowana zostaje możliwość upadku motocykla i jego kierowcy, a odpowiednia konstrukcja zapewnia niski stopień uproszczenia. Praca ma na celu wychwycenie rzeczywistych wpływów zmian parametrów kinematycznych przedniego zespołu na zjawiska drganiowe i uzyskanie materiału do porównań z badaniami drogowymi przy podobnych zakłóceniach ale z zachowaniem bezpiecznej dla kierującego prędkości.

Parametry konstrukcyjne motocykla, których wpływ na postaci drgań jest istotny są tematem wielu opracowań teoretycznych. Przykładowo Vittore Cossalter [3] wskazuje na podstawie analiz teoretycznych, że podstawowymi parametrami mającymi wpływ na częstotliwość drgań oraz tłumienie są prędkość motocykla, współczynnik odporności na znośzenie opony, odcinek wyprzedzenia, tłumienie amortyzatora skrętu, moment bezwładności przedniego zespołu i kąt pochylenia widelca (definiowany jako odchylenie od pionu osi sterowania).

Podobną tematyką zajmuje się Mauro Salvador i inni w swojej pracy [1] wskazując na podstawie badań drogowych również na wpływ podatności prowadzenia koła na występowanie drgań typu wobble. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi momentu na kierownicy dla dwóch różnych prób. Wyraźnie zauważalny jest wzrost amplitud momentu (lewy rys. drgania samowzbudne, prawy rys. wymuszenie impulsem).



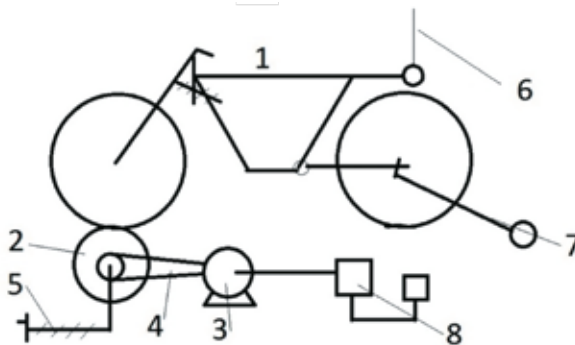
**Rys.2. Przykładowe wyniki badań Mauro Salvadora [1]**

Na wpływ podatności wskazuje również w swojej pracy Verma N. K [4] i inni [8].

W pracy J. Maryniaka i Z. Goraja [5] autorzy przeprowadzają na przykładzie roweru „Ambasador” analizę stateczności wraz z obliczeniami numerycznymi. Traktują oni rower jako układ złożony z czterech mas o więzach nieholonomicznych. Badania obejmujące wpływ doboru parametrów konstrukcyjnych, parametrów kinematycznych i podatności pneumatyków wskazują na znaczną wrażliwość pojazdów jednośladowych na zmianę kąta pochylenia widelca i zmianę odsunięcia koła. Autorzy opisują otrzymane dla badanego pojazdu zakresy optymalnych wartości tych parametrów i zwracają uwagę na konieczność przeprowadzania badań eksperymentalnych do dokładnego opisu stateczności pojazdów jednośladowych.

Również R. Andrzejewski i J. Awrejcewicz [6] zajmują się nieliniową dynamiką pojazdów kołowych. Przedstawione w pracy teoretyczne rozważania dynamiki ruchu pojazdów zawierają również zagadnienia drgań przednich kół typu „shimmy” z zastosowaniem liniowego modelu opony.

## 2. Stanowisko badawcze



**Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1. Motocykl; 2. Rolka napędowa; 3. Silnik; 4. Przekładnia; 5. Układ przesuwania rolki napędowej; 6. Zawieszenie motocykla w pionie; 7. Mocowanie motocykla do stanowiska; 8. Falownik i zasilanie**

Stanowisko na którym przeprowadzano badania jest unikatową konstrukcją pozwalającą napędzać przednie koło motocykla, jednocześnie utrzymując go w pionie nie odbierając mu całkowicie możliwości przechyłów. Na stanowisku pojazd utrzymywany jest w pionie przez dwie sprężyny naciągowe wstępnie napięte. Napięcie wstępne dobrano doświadczalnie. Aby motocykl nie przemieszczał się wzdłuż stanowiska (w płaszczyźnie kół) zastosowano ramę pomocniczą przymocowaną sztywno do tylnego wahacza połączoną ze stanowiskiem poprzez przegub kulowy. Mocowanie to pokrywa się z chwilową osią Mozzi. Chwilowa oś Mozzi jest koncepcją wysuniętą przez Vittore Cossaltera dla opisu przemieszczeń liniowych i kątowych motocykla w czasie jazdy po łukach. Ruch motocykla może być matematycznie opisany jako ruch wokół tej osi. Zgodność wyników badań doświadczalnych z jazdy slalomowej z opisami matematycznymi daje przesłanki do stwierdzenia przydatności teorii osi Mozzi do analizy innych manewrów. Do napędu stanowiska wykorzystano silnik elektryczny sterowany przez falownik. Napęd przekazywany jest na bęben napędowy za pomocą zwalniającej przekładni pasowej. Charakterystyka silnika i falownika pozwalają na płynną zmianę prędkości obrotowej w zakresie od 0 do 30 m/s (od 0 do 110 km/h). Motocykl na stanowisku przedstawiony jest na rysunku 4.



Rys. 4. Motocykl na stanowisku

### 3. Obiekt badań

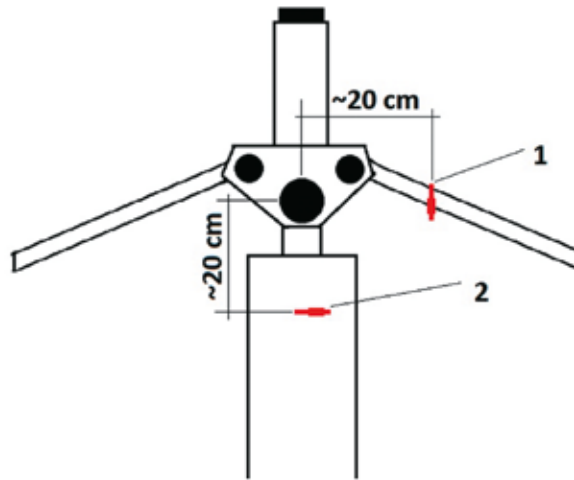
Do przeprowadzenia badań wykorzystano specjalną modyfikację seryjnego motocykla MZ ETZ 150. Przednie zawieszenie składa się z widelca teleskopowego o skoku 185 mm z tłumieniem hydraulicznym. Ogumienie motocykla z przodu dętkowe 3,00 R18. Modyfikacja w stosunku do egzemplarza seryjnego polegała na zabudowaniu układu pozwalającego na płynną zmianę kąta pochylenia widelca. Układ zmieniający kąt pochylenia widelca przedstawiony jest na rysunku 5.



Rys. 5. Układ pozwalający na zmianę kąta pochylenia osi sterowani

### 4. Aparatura pomiarowa

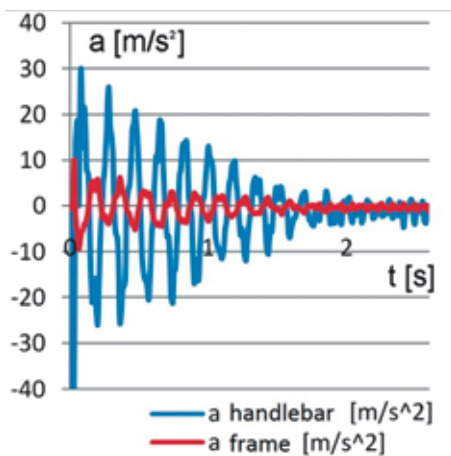
W czasie badań użyto dwóch akcelerometrów typu HBM B12/200 umieszczonych jeden na kierownicy motocykla, drugi na ramie motocykla (jak na rys. 6.). Do rejestracji danych wykorzystano tor składający się z karty pomiarowej Spider 8 podłączonej do archiwizującego komputera przenośnego. Prędkość jazdy rejestrowana była za pomocą głowicy Correvit. Zastosowana aparatura umożliwia pomiar przyspieszeń wybranych punktów motocykla.



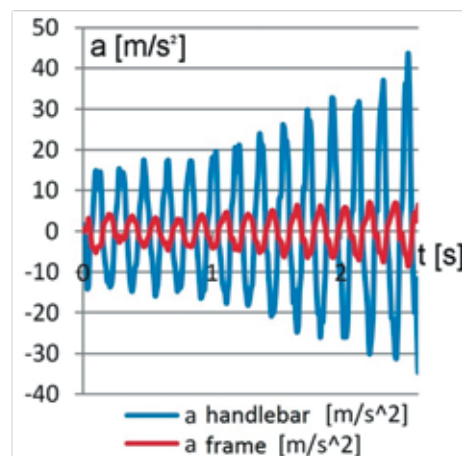
Rys. 6. Schemat mocowania czujników na badanym pojeździe

## 5. Przykładowe wyniki badań

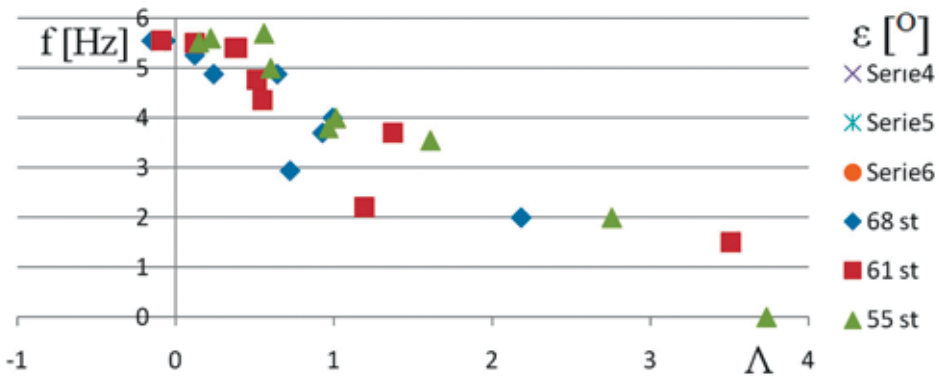
Dla różnych ustawień kątowych i różnych prędkości otrzymano drgania tłumione nadkrytycznie, podkrytycznie oraz samowzbudne. Po przeprowadzeniu badań wyznaczono charakterystyki tłumienia i częstotliwości drgań.



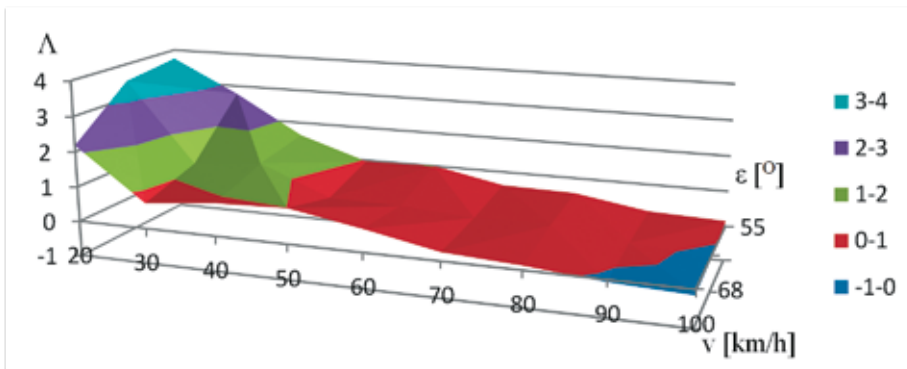
Rys. 7. Przyspieszenia dla prędkości 90 km/h,  $\varepsilon = 61^\circ$



Rys. 8. Przyspieszenia dla prędkości 100 km/h,  $\varepsilon = 68^\circ$



Rys. 9. Częstotliwości drgań w funkcji logarytmicznego dekrementu tłumienia



Rys. 10. Logarytmiczny dekrement tłumienia w funkcji prędkości i kąta pochylenia widelca

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi przyspieszeń na kierownicy w płaszczyźnie prostopadłej do osi sterowania oraz wybranego elementu ramy motocykla. Wymuszony impulsem ruch kierownicy dla prędkości 90 km/h i  $\varepsilon = 61^\circ$  miał charakter gasnący. Dla prędkości 100 km/h i  $\varepsilon = 68^\circ$  zauważalny był wzrost przyspieszeń.

Badania przeprowadzono dla różnych prędkości i różnych ustawień kątowych osi sterowania. Punkty leżące po lewej stronie osi rzędnych na rysunku 9 reprezentują niestabilne drgania wobble. Obszar gdzie dekrement tłumienia przyjmuje wartości ujemne na rysunku 10 jest obszarem w którym drgania nie ulegały wygaszeniu. Drgania typu wobble w tym zakresie są drganiami samowzbudnymi.



## 6. Wnioski

Tendencje wychwycone na stanowisku badawczym są zgodne z teoretycznymi rozważaniami V. Cossaltera. Zmiana kąta pochylenia widelca ma duży wpływ na wartość tłumienia dynamicznego. Zmiana kąta pochylenia widelca o  $13^\circ$  powoduje przesunięcie granicy prędkości samostabilności badanego pojazdu o ponad 20 km/h. Jednak zmiana ta nie ma charakteru liniowego (podobnie jak funkcja wartości tłumienia od prędkości jazdy). Przy niewielkich prędkościach jazdy tendencja motocykla do wpadania w drgania typu woble jest minimalna.

Podjęta próba wykorzystania badań stanowiskowych koniecznych z punktu widzenia bezpieczeństwa jazdy, aby mogła być stosowana do oceny motocykla wymaga przeprowadzenia badań drogowych o podobnym zakresie i porównania wyników. Jeśli wyniki badań drogowych wykażą zgodność z wynikami otrzymanymi na stanowisku bębnowym, to potwierdzi się odpowiednia konstrukcja tego stanowiska pozwalająca na podobne zachowania motocykla jak w rzeczywistym ruchu i będzie ono mogło być stosowane do oceny stabilności pojazdów jednośladowych bez narażania ich na upadek w czasie badań drogowych. Wykorzystane stanowisko badawcze może być również wykorzystane do badań przy zmianie innych parametrów takich jak ciśnienie w ogumieniu, rozmiar koła, rodzaj opony itp., na których wpływ na postaci drgań wskazują autorzy V. Cossalter [3] i M. Salvador [1] w swoich pracach.

## Bibliografia

- [1] SALVADOR M., FABRIS DA.: *Study of stability of a two wheeled vehicle through experiments on the Road and in the laboratory*, Automobili Motori High-Tech, Modena 2004.
- [2] ELLIS J.R.: *Vehicle Dynamics*, London Business Books Limited 1975.
- [3] COSSALTER V.: *Motorcycle Dynamics*, Greendale 2002.
- [4] VERMA M. K., SCOTT R. A., SEGEL L.: *Effect of Frame Compliance on the Lateral Dynamics of Motorcycles*, Vehicle System Dynamics, Vol. 9 (1980).
- [5] MARYNIAK J., GORAJ Z.: *Stateczność pojazdów jednośladowych na kołach pneumatycznych*, Mechanika Teoretyczna i Stosowana 4, 12 (1974).
- [6] ANDRZEJEWSKI R., AWREJCWICZ J.: *Nonlinear Dynamics of a Wheeled Vehicle*, Springer, Berlin 2005.
- [7] ŚLUSARCZYK P.: *Analiza wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na stateczność i kierowność motocykla*, praca doktorska PK, Kraków 2007.
- [8] SHARP R.S., ALSTEAD C.J.: *The Influence of Structural Flexibilities on the Straight-Running Stability of Motorcycles*, Vehicle System Dynamics, Vol. 9 (1980).
- [9] BELLATI A. COSSALTER V., GARBIN S.: *Mechanism of steering control of motorcycles*. Department of Mechanical Engineering, University of Padova [www.dinamoto.it](http://www.dinamoto.it)
- [10] ZELLNER J.W., WEIR D.H.: *Development of Handling Test Procedures for Motorcycles*. SAE Paper No.780313, 1978.
- [11] WISSELMANN D., IFFELBERGER L., BRANDLHUBER B.: *Einsatz eines Fahrdynamik – Simulationsmodells in der Motorradentwicklung bei BMW*. ATZ 95, 1993.
- [12] ŚLUSARCZYK P.: *Analiza modelowa stateczności pojazdu jednośladowego*. Czasopismo Techniczne, Wyd. PK, Zeszyt 7-M, Kraków 2004.
- [13] PAPADOPOULOS J. M.: *Bicycle and Motorcycle Balance and Steer Dynamics*. Technical Report 7/3/1990, Cornell University <http://ruina.tam.cornell.edu/research/>
- [14] GRZEGOŻEK W., ADAMIEC-WÓJCIK I., WOJCIECH S.: *Komputerowe modelowanie dynamik pojazdów*. Politechnika Krakowska 2003 Książka akademicka.