

MOBILNY MODEL DO BADAŃ DYNAMIKI SAMOCHODÓW

KAZIMIERZ M. ROMANISZYN¹

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Streszczenie

W publikacji zostały przedstawione problemy, na jakie napotyka się przy badaniach stateczności dużych samochodów ciężarowych i samochodów specjalnych. Zaprezentowano koncepcję budowy mobilnych, zdalnie sterowanych modeli samochodów, których cechy mogą w pewnym przybliżeniu odwzorowywać stateczność pojazdów rzeczywistych. Założono, że budowane mobilne modele powinny spełniać wybrane kryteria podobieństwa w stosunku do pojazdu rzeczywistego. W publikacji tej zostały opisane problemy przy budowie takich modeli. Pierwszy z nich został zbudowany w celu badań sygnalizatorów zagrożenia wywrotem zarówno w warunkach dynamicznych, jak i statycznych. Model ten zbudowano w skali 1: 10 w stosunku do wielkości samochodu rzeczywistego. Samochód był napędzany silnikiem elektrycznym współpracującym z trzybiegową mechaniczną skrzynią przekładniową.

Konstrukcja drugiego ma z założenia odwzorowywać stateczność ruchu zadanego pojazdu rzeczywistego przy zachowaniu wybranych podobieństw między modelem i samochodem rzeczywistym. Samochód ten zbudowano w skali około 1:5 w stosunku do wymiarów samochodu rzeczywistego. Napęd modelu stanowił dwusuwowy silnik spalinowy, a układ napędowy umożliwiał napęd 4x2 lub 4x4. Układ sterowania modelem samochodu pozwalał na odwzorowywanie badań stateczności zgodnie z wybranymi standami ISO.

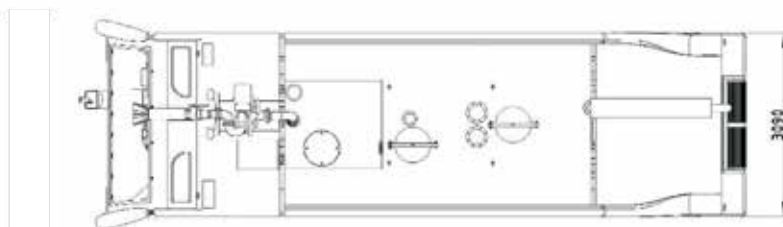
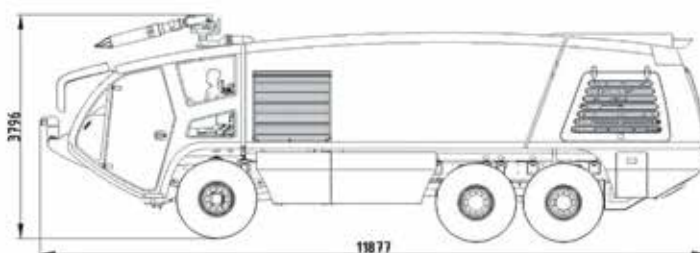
Zaprezentowana praca powstała w trakcie realizacji projektu badawczo- rozwojowego NCBR nr. PB 5478/B/T02/2011/40 pt. „Ocena stateczności rzeczywistego pojazdu na podstawie badań mobilnego modelu”.

Słowa kluczowe: mobilny model, modelowanie dynamiki, podobieństwo

1. Wprowadzenie

Badania trakcyjne samochodów, a dużych samochodów ciężarowych i specjalnych w szczególności, nastęrczają wiele trudności logistycznych. Wymagają one specjalnych torów badawczych i zabezpieczeń, a do tego są badaniami drogimi i uzależnionymi od warunków atmosferycznych. Dotyczy to szczególnie badań według testów [1,2,3,4]. W publikacji zostały przedstawione próby przeprowadzenia badań stateczności na specjalnie skonstruowanych modelach samochodów. Oczywiście należy się spodziewać, że badania

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku - Białej, Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, e-mail: kromaniszyn@ath.bielsko.pl, tel. 33 827 93 49, wew. 234



Rys. 1. Ciężki lotniskowy samochód gaśniczy FELIKS 6x6 o masie 36 000 kg



Rys. 2. Samochód pożarniczy o masie 12 ton i wysoko położonym środku ciężkości

na modelach nie zastąpią ostatecznych badań na samochodzie rzeczywistym, jednak pozwolą na wstępną ocenę dynamiki i stateczności ruchu w określonych testach jezdnych, w powtarzalnych warunkach laboratoryjnych. Pomysł takiego podejścia do oceny stateczności ruchu zrodził się po serii badań dużych samochodów specjalnych o wysoko położonych środkach ciężkości. Szczególne problemy dotyczą badań dużych pojazdów specjalnych podobnych do przedstawionych na rysunkach 1 i 2.

Pierwszą inspiracją do budowy zdalnie sterowanego mobilnego modelu samochodu była konieczność przeprowadzenia licznych badań czujników sygnalizacji zagrożenia przewróceniem, dedykowanych samochodom o wysoko położonych środkach ciężkości. Opis modelu i badań wykonanych przy jego wykorzystaniu zaprezentowano w [5]. Zestaw takiego czujnika przedstawia rysunek 3. Składa się on z czujnika (w górnej części rys.3) i sygnalizatora, który można zamontować w wybranym miejscu kabiny kierowcy. W opisanym przypadku na modelu badano funkcjonowanie czujnika przyspieszeń x-y, wyposażonego w akustyczny i optyczny sygnalizator poziomu przyspieszeń bocznych o założonym dolnym (początkowym) i górnym progu sterowania nadawanym sygnałem. Badany sygnalizator może być wykorzystywany jako czujnik zagrożenia przewróceniem samochodu na skutek działania sumarycznego przyspieszenia pochodzącego od ruchu po łuku w połączeniu z pochyleniem bocznym. Konstrukcja czujnika pozwala na ustalenie progu początku sygnalizacji na złożonym poziomie przyspieszenia bocznego. Częstość działania sygnału świetlnego i akustycznego rośnie od momentu przekroczenia założonego dolnego progu przyspieszenia; z chwilą osiągnięcia górnego progu przyspieszenia ustalonego dla danego typu samochodu, a stanowiącego przyspieszenie graniczne, przy którym następuje faktyczne przewrócenie samochodu, sygnał staje się ciągły.

Dodatkową korzyścią wynikającą z realizacji badań dynamicznych na modelu jest możliwość ich realizacji aż do utraty stateczności, co w przypadku badań na rzeczywistym samochodzie wiąże się ze znacznymi stratami i zagrożeniem dla badaczy. Stosowanymi metodami zabezpieczeń w takich przypadkach są montowane dodatkowo podpory boczne wyposażone w koła. Stosowanie takich rozwiązań ma jednak wiele cech negatywnych,



Rys.3. Układ do sygnalizacji zagrożenia przewróceniem samochodu

do których można zaliczyć zmianę parametrów samochodu badanego, wynikającą z odmiennego rozkładu obciążeń i dodatkowych bezwładności przy stosowaniu wspomnianych podpór. Autor zna również przypadki przekroczenia wytrzymałości takich zabezpieczeń i rzeczywistych przewróceń samochodów badawczych.

Wyżej wymienione względy wskazują na słuszność skierowania zainteresowań na badania przy użyciu modeli.

2. Budowa modelu do badań trakcyjnych czujników zagrożenia przewrotem

Aby model możliwie wiernie odwzorowywał warunki i dynamikę ruchu rzeczywistego samochodu, powinien spełniać następujące kryteria:

- kinematyka przeniesienia napędu z silnika do kół powinna być odwzorowaniem rzeczywistego układu napędowego,
- rozkład nacisków na osie i wysokość położenia środka masy powinny być proporcjonalne do występujących w samochodzie rzeczywistym,
- prędkości w ruchu liniowym (w tym prędkość maksymalna) powinny być proporcjonalne do wymiarów samochodu,
- kinematyka zawieszni i sztywność opon powinny być proporcjonalne do charakterystyk występujących w samochodzie rzeczywistym.

Kierując się tymi wytycznymi, do badań modelowych postanowiono wykorzystać jako bazę model samochodu ciężarowego Mercedes 5982. Model ten wyposażony jest w silnik elektryczny, który napędza tylne koła przez trzybiegową skrzynię biegów, wał napędowy, most z przekładnią główną i symetrycznym mechanizmem różnicowym. Zawieszania modelu są typu zależnego z wykorzystaniem resorów piórowych i amortyzatorów ciernych (możliwa opcja z amortyzatorami hydraulicznymi).

W celu modelowania rozkładu nacisków na osie wykonano specjalny pojemnik mocowany do skrzyni ładunkowej. W pojemniku umieszczono podstawę pozwalającą na płynne przesuwanie obciążnika, czujniki pomiarowe, zasilanie i sygnalizator przekroczenia zadanego przyspieszenia bocznego. Sygnalizator generował sygnał dźwiękowy i świetlny w postaci rozbłysków diody świetlnej umieszczonej na dachu skrzyni ładunkowej. Również na dachu skrzyni umieszczono nadajnik do teletransmisji danych z czujnika przyspieszeń.

Odbiornik układu sterowania modelem został umieszczony w kabinie kierowcy. Obsługiwał on regulator prędkości, serwomechanizm zmiany biegów i skrętu kół kierowanych. Model został wyposażony w boczne koła podporowe zapobiegające przewrotom.

Rysunek 4 przedstawia ogólny widok modelu. Widoczne są boczne koła podporowe, na dachu skrzyni ładunkowej dioda sygnalizacyjna i nadajnik teletransmisji.

Na rysunku 5 zostało zaprezentowane zawieszenie osi przedniej i układ kierowniczy. Rysunek 6 prezentuje tylny most napędowy podparty na resorach piórowych i wyposażony w amortyzatory.



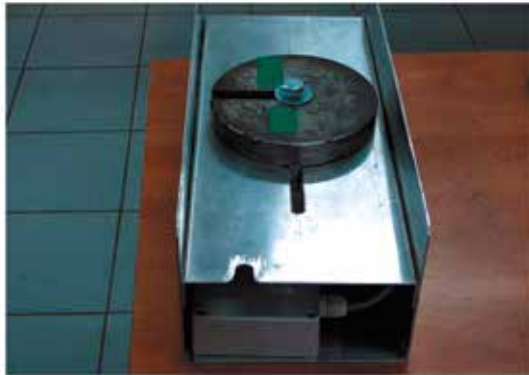
Rys.4. Ogólny widok modelu do badań czujnika przyspieszeń



Rys. 5. Widok osi przedniej i układu kierowniczego



Rys.6. Widok mostu tylnego zawieszzonego na resorach wielopiórowych



Rys.7. Pojemnik z obciążnikiem do określania położenia środka masy



Rys.8. Umieszczenie pojemnika w nadwoziu samochodu



Rys.9. Wyznaczanie środka masy metodą ważenia nacisków osi

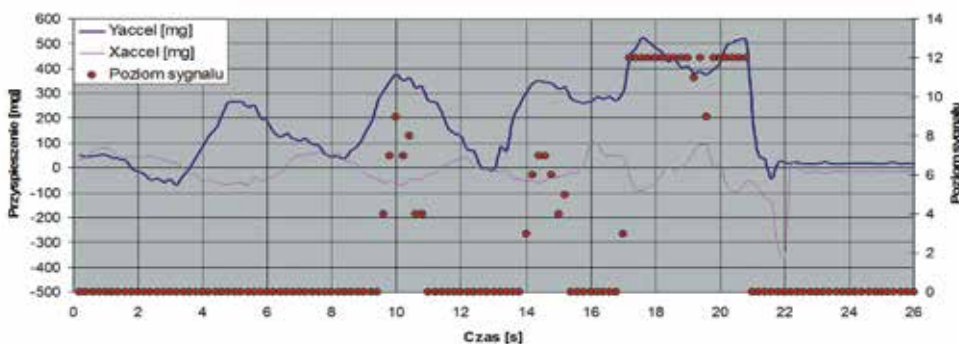
Rysunki 7 i 8 przedstawiają pojemnik z aparaturą i ruchomym obciążnikiem dla uzyskania pożądanego położenia środka ciężkości.

Rysunek 9 przedstawia metodę określania położenia środka masy metodą pomiarów sił nacisków osi. Masa całkowita modelu gotowego do badań wynosiła 9, 260 kg.

3. Badania dynamiczne z użyciem modelu

Model samochodu o założonych parametrach położenia środka ciężkości poddawany był badaniom ruchowym, rejestrując przyspieszenia wzdłużne, poprzeczne i poziomy sygnału (alarmu) sygnalizatora zagrożenia przewrotem. Dane z czujników przesyłano telemetrycznie do przenośnego komputera, gdzie sygnały przetwarzano i przedstawiano w wymaganej formie graficznej. W opisanych badaniach progowe początkowe przyspieszenie boczne ustawiono na $3,5 \text{ m/s}^2$, co stanowiło pierwszy poziom sygnalizacji, a ciągły sygnał na granicy wywrócenia ustalono na poziomie $4,5 \text{ m/s}^2$.

W próbie zarejestrowanej na rys. 10 model poruszał się po okręgu na płaszczyźnie o nachyleniu $3,5$ stopnia z rosnącymi prędkościami. Na wykresie widoczne jest dodawanie przyspieszeń wynikających z pochylenia nawierzchni i przyspieszenia dośrodkowego, gdy samochód znajduje się w dolnej części płaszczyzny i odejmowanie przyspieszeń w górnej części płaszczyzny. Od 17 do 21 sekundy samochód utracił stateczność poprzeczną (ciągły sygnał alarmu) i poruszał się podpierając kołem bocznym. Wypadkowe przyspieszenie pochodzące od składowej siły ciężkości i od przyspieszenia dośrodkowego wyniosło około 5 m/s^2 .



Rys.10. Przebiegi przyspieszeń i poziomu alarmu sygnalizatora dla próby jazdy po okręgu na płaszczyźnie o nachyleniu $3,5$ stopnia z rosnącymi prędkościami

4. Budowa modelu do badań stateczności

Model opisany w poprzednich rozdziałach, ze względu na swoje niewielkie wymiary, nie pozwalał na prowadzenie szerszych badań dotyczących stateczności. Z tego względu zbudowano całkowicie nowy zdalnie sterowany model samochodu. Model napędzany jest silnikiem spalinowym o znacznej mocy, przenoszący napęd przez automatyczne sprzęgło. W mostach napędowych zastosowano symetryczne mechanizmy różnicowe.

Cechy konstrukcyjne modelu pozwalają na:

- stosowanie napędu 4x4 i 2x4 (może być napędzana oś przednia lub tylna),
- zmiany rozstawu osi i kół,
- stosowanie opon o różnych charakterystykach sztywności,
- stosowanie różnych typów zawieszzeń (zależne i niezależne) z amortyzatorami olejowymi o zadanych tłumieniach,
- modelowanie różnego położenia środka ciężkości,
- stosowanie różnych kątów ustawienia kół kierowanych,
- zabudowę aparatury badawczej i teletransmisję danych pomiarowych do stacjonarnego odbiornika.

5. Warunki podobieństwa mobilnego modelu fizycznego i rzeczywistego pojazdu

Przy budowie tego modelu postanowiono wykorzystać teorię podobieństwa Π -Buckingham'a [6] względem parametru rzeczywistego przy założonej skali. Wspomniana teoria podobieństwa, mimo że pochodzi z 1914 roku, jest wykorzystywana współcześnie przez wielu badaczy [7,8,9,10]. Według tej teorii przyjmuje się, że jeżeli układ może być opisany za pomocą k zmiennych, to opis matematyczny przedstawia się następująco:

$$u = f(u_1, u_2, u_3, \dots, u_k) \quad (1)$$

Jeżeli ten sam układ opiszemy za pomocą wielkości bezwymiarowych to zapis przyjmie postać:

$$\Pi = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{k-r}) \quad (2)$$

To z teorii Π -Buckingham'a wynika, że do opisu systemu potrzeba mniej zmiennych niż w układzie wymiarowym. Ilość zmiennych zostanie zredukowana o r , tj. do minimalnej liczby wymiarów, potrzebnej do zdefiniowania wszystkich zmiennych systemu. Zazwyczaj podstawowymi zmiennymi są masa, długość i czas (MLT), jedynym wymaganiem jest to, że zmienne podstawowe nie mogą być składane do tworzenia grupy bezwymiarowej. Ten warunek znany jest również jako niezależność wymiarowa.

Z warunku podobieństwa wynika, że jeżeli dwa systemy mogą być opisane za pomocą tych samych zmiennych i pracują w tych samych warunkach, to są podobne. Co odpowiada zależności:

$$\Pi_{pojazd} = \Pi_{model} \quad (3)$$

Jeżeli wszystkie grupy Π dla modelu i dla prototypu są takie same, to układy są podobne.

Występują trzy generalne współczynniki skali, które muszą być analizowane:

- podobieństwo geometryczne – skala długości,
- podobieństwo dynamiczne – skala siły,
- podobieństwo kinematyczne – skala prędkości lub przyspieszenia.

Jeżeli zależności podobieństwa którejs z grup nie są spełnione, mówi się o modelu rozstrojonym. W tym przypadku analiza wyników jest znacznie trudniejsza. Do opisu modeli wykorzystano parametry charakteryzujące te modele. Do sprawdzenia podobieństwa dynamicznego wybrano parametry, które wykorzystano przy tworzeniu parametrów bezwymiarowych (Π parametrów). Parametry te były normalizowane przy wykorzystaniu skali masy, długości i czasu, wykorzystując do tego celu masę pojazdu, jego rozstaw osi (skala długości) oraz prędkość wzdłużną U . W efekcie zostały utworzone parametry bezwymiarowe zestawione poniżej [7].

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{l_f}{L}, \quad \Pi_2 = \frac{l_r}{L}, \quad \Pi_3 = \frac{C_{af} \cdot L}{m \cdot U^2}, \quad \Pi_4 = \frac{C_{ar} \cdot L}{m \cdot U^2}, \quad \Pi_5 = \frac{I_{xx}}{m \cdot L^2}, \\ \Pi_6 &= \frac{I_{yy}}{m \cdot L^2}, \quad \Pi_7 = \frac{I_{zz}}{m \cdot L^2}, \quad \Pi_8 = \frac{I_{xz}}{m \cdot L^2}, \quad \Pi_9 = \frac{I_{xz_s}}{m \cdot L^2}, \quad \Pi_{10} = \frac{h_{GC}}{L}, \\ \Pi_{11} &= \frac{h_{RC}}{L}, \quad \Pi_{12} = \frac{b}{L}, \quad \Pi_{13} = \frac{m_s}{m}, \quad \Pi_{14} = \frac{K_\phi}{m \cdot U^2}, \quad \Pi_{15} = \frac{D_\phi}{m \cdot U \cdot L} \end{aligned} \quad (4)$$

Gdzie: L – rozstaw osi, l_f , l_r – odległości środka ciężkości od osi przedniej i tylnej, C_{af} , C_{ar} – współczynniki odporności na boczne znoszenia opon kół osi przedniej i tylnej, m , m_s – masa całkowita i masa resorowana, U – prędkość wzdłużna, I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} , I_{xz} , I_{xz_s} – masowe momenty bezwładności względem osi X, Y, Z, i momenty dewiacji, h_{GC} , h_{RC} – wysokości środka ciężkości i osi przechyłu, K_ϕ , D_ϕ – współczynniki sztywności i tłumienia przechyłu nadwozia.

Uzyskanie podobieństwa dynamicznego warunkuje równość parametrów Π dla pojazdu i mobilnego modelu fizycznego.

Przy budowie modelu uzyskano zbliżone parametry podobieństwa, jedynie parametry przechyłowe nieco się różniły. Można się więc spodziewać pewnych rozbieżności między zachowaniem się pojazdu pełnowymiarowego i mobilnym modelem w skali. Różnice te będą wymagały odpowiedzi na pytanie, czy są one istotne, czy nie. Z wcześniejszych prac autorów [11,12] wynika, że rozkład parametrów charakterystycznych dla pojazdów pełnowymiarowych odpowiada parametrom mobilnego modelu przy jego podobieństwie konstrukcyjnym. Część parametrów, takich jak charakterystyki zawieszzeń, opon oraz dynamika wywrotu, może nie być zadowolająca. Różnice wynikające z niedoskonałości modelu będą sprawdzone na podstawie badań eksperymentalnych.

6. Budowa mobilnego modelu i układu sterowania

Rysunek 11 przedstawia widok modelu, w którym dla zachowania podobieństwa rozkładu mas zabudowano specjalną ramę pozwalającą na zmiany położenia środka ciężkości. Pierwotnie zakładano, że mobilny model będzie sterowany ręcznie na podstawie widoku z kamery, transmitowanego na monitor stanowiska sterowniczego. Zbudowano specjalne stanowisko sterownicze, z którego kierowca-operator może sterować modelem przy pomocy standardowego układu kierowniczego samochodu, śledząc obraz z kamery zamontowanej na modelu. W pierwszym podejściu ruch koła kierownicy skręcał koła kierowane modelu z takim przełożeniem jak w samochodzie rzeczywistym, co uzyskano przez zastosowanie w układzie sterującym oryginalnej przekładni kierowniczej napędzającej potencjometr. Widok takiego stanowiska sterowniczego przedstawia rysunek 12. To stanowisko sterownicze służyło również do prób badań dynamiki ruchu modelu przy sterowaniu wzrokowym bez użycia kamery i monitora. Widok takiego stanowiska zabudowanego na specjalnym podeście prezentuje rysunek 13. Na rysunku tym widoczny jest układ pomiaru kątów obrotu koła kierownicy.



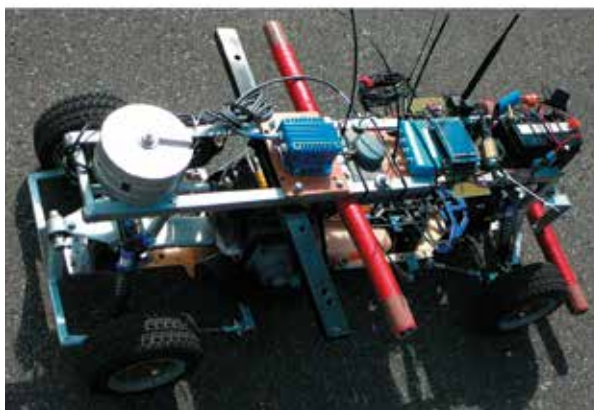
Rys.11. Widok mobilnego modelu badawczego z obciążnikami i kamerą teletransmisji obrazu do stanowiska sterowniczego



Rys.12. Widok stanowiska sterowniczego mobilnego modelu samochodu. Po lewej dla sterowania z kontaktem wzrokowym, po prawej dla sterowania z obrazu na monitorze



Rys.13. Widok stanowiska sterowniczego mobilnego modelu samochodu dla sterowania z kontaktem wzrokowym, zabudowany na podeście



Rys. 14. Widok modelu do badań dynamicznych z sekwencyjnym procesem sterowania kół kierowanych i rejestracją toru ruchu przez układ GPS

Niestety, precyzja sterowania modelem przy użyciu opisanego stanowiska sterowniczego okazała się niezadawalająca dla realizacji testów opisanych w [1,2,3,4]. Skłoniło to realizatorów pracy do przebudowania systemu sterowania. W nowym systemie sterowania zadany tor ruchu modelu został zapisany w pamięci komputera sterującego, który przez nadajnik radiowy sekwencyjnie sterował mechanizmem kierowniczym modelu. Rzeczywistą trajektorię ruchu modelu rejestrowano przy użyciu precyzyjnego systemu GPS z dokładnością 2 cm. Na rysunku 14 przedstawiono model sterowany w takim systemie.

Wstępne wyniki badań modelu wykazały korelacje z wynikami badań stateczności samochodu rzeczywistego z pewnym błędem, jednak okazały się przydatne do ocen jakościowych. Kompleksowe zestawienie wyników badań i ich porównań z wynikami badań samochodów rzeczywistych będą zaprezentowane w dalszych publikacjach dotyczących tego zagadnienia.

7. Podsumowanie

W zaprezentowanej publikacji wykazano, że w pewnym zakresie można prowadzić funkcjonalne badania dynamiczne na mobilnym modelu samochodu. Wierność odwzorowania ruchu rzeczywistego samochodu wymaga zachowania wybranych podobieństw między parametrami geometrycznymi i masowymi modelu i samochodu rzeczywistego. Zagadnienie podobieństw będzie przedmiotem odrębnej publikacji. Również w kolejnych publikacjach poświęconych tematowi korelacji między badaniami stateczności samochodu rzeczywistego i modelu będą przedstawione wyniki badań stateczności samochodu ciężarowego i odniesione do nich wyniki badań na zaprezentowanym mobilnym modelu samochodu.

Literatura

- [1] Norma ISO 7401. *Skokowe wymuszenie kierownicą.*
- [2] Norma ISO 4138. *Jazda po okręgu.*
- [3] Norma ISO 3888. *Zmiana pasa ruchu.*
- [4] Road Vehicles-heavy commercial vehicle combinations and articulated buses lateral stability test methods ISO 14 791.
- [5] ROMANISZYN K.M.: *Mobilny model samochodu do badań dynamicznych*; Logistyka 3/2012, wydanie na CD.
- [6] BUCKINGHAM E.: *On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations*, Physical Review 4 (345-376).
- [7] PARCZEWSKI K., WNEK H.: *Wykorzystanie teorii podobieństwa do analizy stateczności ruchu samochodu na podstawie badań mobilnego modelu*, Logistyka 3/2012, wydanie na CD.
- [8] SEAN N. BRENNAN: *Modeling and control issues associated with scaled vehicles*, praca kwalifikacyjna University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [9] VIGNAUX, G.A.: *Dimensional analysis in data modeling*, Victoria University of Wellington v.15, 2005.
- [10] GIBBINGS J.C.: *Dimensional Analysis*, Springer 2011, ISBN 1-84996-316-9
- [11] PARCZEWSKI K., WNEK H.: *Modele fizyczne pojazdów w skali do badania dynamiki ruchu*, Czasopismo Techniczne, Kraków, 3-M/2012, Zeszyt 8 Rok 109 (35-46).
- [12] PARCZEWSKI K., WNEK H.: *Wykorzystanie modelu samochodu do analizy ruchu pojazdu po torze krzywoliniowym*, Eksploatacja i Niezawodność, Lublin 2010/4.