

Study of the vehicle dynamics with the application of scale models

Abstract: The paper presents an attempt to use physical models of vehicles on a scale to analyze the dynamics of the real motion of vehicles. Geometric parameters of the model and the kinematics and dynamics of motion defined using the theory of similarity and dimensional analysis. The problems associated with the construction and control models was presented. Considerations for stability of the vehicle motion connected with its characteristic parameters such as weight distribution on each axis, the height of the center of mass, moments of inertia of both the vehicle and the sprung mass and the stiffness and damping of the body as well as the position of the roll axis and the characteristic parameters of the tire. A separate problem is the control of model, time delay and repetition performed maneuvers. Despite the structural design results are very promising and allow for the transfer of the results of tests of the mobile model on a real vehicle. This means that in the case of vehicles manufactured individually, or vehicle, where tests can not be done, it may be replaced by tests and measurements made on the scale model.

Keywords: similarity, study of mobile vehicle models, stability testing of vehicles, model test

Badanie dynamiki ruchu pojazdu z wykorzystaniem modeli wykonanych w skali

Streszczenie: W pracy przedstawiono próbę wykorzystania modeli fizycznych pojazdów w skali do analizy dynamiki ruchu rzeczywistych pojazdów. Parametry geometryczne modelu oraz kinematykę i dynamikę ruchu określono wykorzystując teorię podobieństwa i analizę wymiarową. Omówiono problemy związane z konstruowaniem i sterowaniem modeli. Zagadnienia dotyczące stateczności ruchu pojazdu wiążą się z jego parametrami charakterystycznymi takimi jak: rozkład mas na poszczególne osie, wysokość środka ciężkości, momenty bezwładności zarówno całego pojazdu jak i masy resorowanej oraz sztywność i tłumienie drgań nadwozia a także położenie osi przechyłu i parametry charakterystyczne opon. Osobny problem stanowi sterowanie modelem, zwłoka czasowa i powtarzalność wykonywanych manewrów. Pomimo problemów konstrukcyjnych wyniki badań są bardzo obiecujące i pozwalają na przeniesienie wyników pomiarów z mobilnego modelu na pojazd rzeczywisty. Co oznacza, że w przypadku pojazdów, produkowanych jednostkowo, bądź pojazdów, których badań nie da się przeprowadzić, można je zastąpić badaniami i pomiarami wykonanymi na modelu w skali.

Słowa kluczowe: podobieństwo, badania mobilnych modeli pojazdów, badania stateczności pojazdów, badania modelowe

1. Wprowadzenie

Badania poligonowe pojazdów, produkowanych ma masową skalę, prowadzone są przez ich producentów a także przez instytucje niezależne przewidziane do tego rodzaju badań lub na zlecenie organizacji konsumenckich. Pojazdy te są badane według procedur opisanych w normach. Przy samochodach ciężarowych badania prowadzi się dla kompletnych pojazdów, rzadziej dla podwozi pod zabudowę [6]. Badania te są kosztowne i stwarzają wiele problemów. W przypadku pojazdów specjalizowanych, w których nadwozia są produkowane jednostkowo o dużym zindywidualizowaniu, tego typu badania są przyjmowane na podstawie wyników dla kompletnego pojazdu, zazwyczaj z zabudową skrzyniową. Badania pojazdów specjalnych o cechach różnych w zależności od życzeń zamawiającego, badania prowadzone są w bardzo ograniczonym zakresie. Pomimo wszystko pojazd powinien spełniać wymagania dotyczące stateczności ruchu. Takim rozwiązaniem mogą być badania symulacyjne lub badania

poligonowe prowadzone na mobilnym modelu spełniającym warunki podobieństwa.

Inną grupą pojazdów, dla której mogą być przeprowadzane badania modelowe są nowo konstruowane pojazdy lub ich zespoły, których rozwiązania konstrukcyjne znacznie różnią się od pojazdów istniejących, czy przebadanych. Od wielu lat badania dotyczące oporów powietrza są prowadzone w tunelach aerodynamicznych. Jednakże mogą być rozszerzone na badania układów kierowniczych, hamulcowych, stabilizacji toru jazdy, czy rozdziału momentu napędowego.

Kolejną grupą pojazdów, w których badania mobilnego modelu mogą być pomocne są pojazdy z przeznaczeniem do ruchu po bezdrożach, śniegu, mokradłach itp. W tym przypadku badania tego typu mogą mieć charakter nie tylko kwalifikacyjny ale również poznawczy.

W dalszej części pracy omówiono wymagania stawiane badaniom mobilnych modeli oraz problemami konstrukcyjnymi występującymi w tego typu badaniach.

2. Wykorzystanie teorii podobieństwa do modelowania ruchu pojazdu

Budowa złożonych technicznie konstrukcji takich jak pojazdy, wymaga wyznaczenia wielu parametrów wynikających z jego wymiarów, masy, osiągow itp. W wielu przypadkach możliwe jest przeprowadzenie badań rzeczywistego obiektu, jednak przy dużej skali obiektu badania te są trudne do wykonania, bardzo kosztowne lub niebezpieczne. Doświadczenia na modelach są prowadzone zgodnie z wymogami teorii podobieństwa tak by uzyskane wyniki mogły być przeniesione na badany obiekt rzeczywisty. Do określania kryteriów podobieństwa służy analiza wymiarowa. Zasady teorii podobieństwa i analizy wymiarowej są znane od wielu lat. Niektóre z podstawowych założeń teorii podobieństwa i analizy wymiarowej pojawiły się już w pracach Fouriera na początku XIX wieku, ale większy jej rozwój datuje się na koniec XX wieku, dotyczy to prac Rayleigha, Reynoldsa, Maxwella, Frouda, Carvallo, Paschy i innych [20]. Do 1920 roku podstawowe zasady analizy wymiarowej były już znane.

Buckingham zaprezentował szeroko stosowane obecnie twierdzenie π [2], a Bridgman opublikował monografię, która do dziś jest podstawową publikacją z tej dziedziny. Obecnie analiza wymiarowa i teoria podobieństwa ma zastosowanie w takich dziedzinach jak: aerodynamika, hydraulika, konstrukcja statku, napędu, wymiana ciepła i masy, spalanie, mechanika konstrukcji w zakresie sprężystym i plastycznym, mechanika oraz interakcja płyn-struktura, teoria elektromagnetyczna, promieniowanie, astrofizyka, podwodne i podziemne wybuchy jądrowe, dynamika wpływu oraz reakcje chemiczne (Siedow, 1959, Baker i wsp., 1973, Kurth, 1972, Lokarnik, 1991) [21], a także biologia (McMahon i Bonner, 1983), a nawet w literaturze (de Jong, 1967).

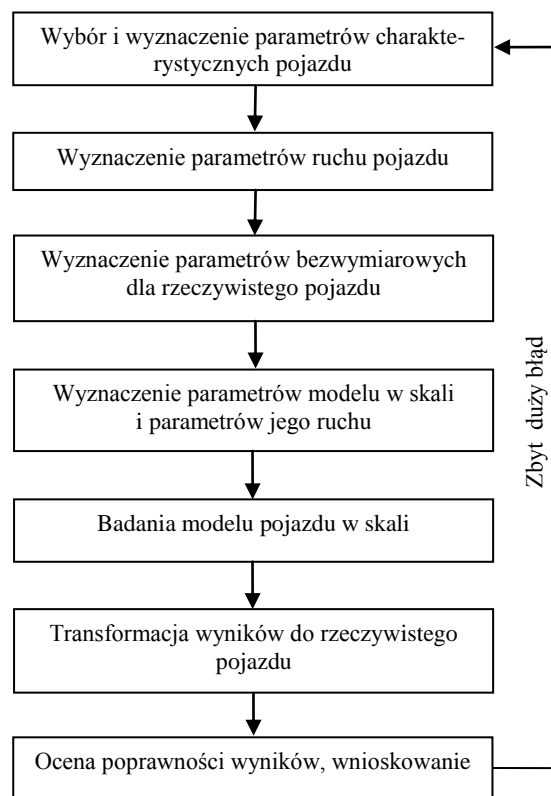
Wykorzystanie teorii podobieństwa a szczególnie podobieństwa geometrycznego, kinematycznego i dynamicznego do analizy stateczności ruchu pojazdu wymaga wyznaczenia, porównania i uwzględnienia parametrów wpływających na dynamikę ruchu pojazdu. Przeniesienie tych parametrów na model, wymaga dostosowania jego wymiarów, mas, sztywności itp. tak by spełnione były kryteria podobieństwa. Porównanie zachowania się pojazdu pełnowymiarowego i mobilnego modelu w mniejszej skali, może być prowadzone przy wykorzystaniu parametrów bezwymiarowych. Tu pomocna staje się teoria π -Buckingham'a pozwalająca na wyznaczenie poszczególnych parametrów pojazdu jako bezwymiarowych oraz znając te parametry, można wykorzystując skalę podobieństwa aby określić wymagane parametry modelu.

Aby można było porównywać i by odnieść wyniki badań mobilnego modelu do dynamiki ruchu

pojazdu, muszą być spełnione zależności zwane kryteriami podobieństwa. Zależności te dotyczą zarówno samej konstrukcji modelu jak i warunków jego ruchu oraz sił obciążających [3,7]. Występują generalnie trzy kryteria, które muszą być analizowane:

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

Spełnienie tych kryteriów pozwala na interpretację wyników badań modeli i odniesienie ich do dynamiki ruchu pojazdu rzeczywistego.



Rys. 1. Schemat postępowania podczas analizy ruchu pojazdu rzeczywistego z wykorzystaniem badań mobilnego modelu w skali

3. Modele fizyczne – problemy konstrukcyjne, zachowanie warunków podobieństwa

Zalety stosowania mobilnych modeli pojazdów w skali

Istnieje kilka zalet stosowania modelu pojazdu w skali zamiast samochodu pełno-wymiarowego, wykorzystywanego podczas badań eksperymentalnych dynamiki ruchu:

- koszt badań pojazdu wykonanego w skali są znacznie mniejsze niż pojazdu pełnowymiarowego, to samo dotyczy materiałów eksploatacyjnych i części zamiennych,

- znacznie łatwiej jest wprowadzić zmiany do pojazdu w mniejszej skali,
- badania mobilnego modelu pojazdu wymagają mniej miejsca i są dużo bezpieczniejsze w obsłudze,
- ewentualne wywrócenie modelu pojazdu pociąga za sobą znacznie mniejsze koszty napraw,
- pojazdy wykonane w skali ze sterowaniem drogą radiową lub za pośrednictwem przewodu, są dostępne na rynku w różnych rozmiarach i rodzajach, zazwyczaj są one przeznaczone do użytku rekreacyjnego. Mogą jednak służyć jako baza do budowy modeli wykorzystywanych w badaniach poligonowych.
- mobilny model pojazdu, poza parametrami podobieństwa analizowanymi przy jego budowie, charakteryzuje się także podobieństwem konstrukcyjnym całego modelu jak i jego zespołów.

Modele do badań dynamiki ruchu pojazdu wykonane w ATH Bielsko-Biała

W Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej od 2004 roku są budowane modele do analizy stateczności pojazdów [9,11,12,14,15,16,17,22,23,24,26], począwszy od modelu samochodu ciężarowego w skali 1:14 zbudowanego podczas opracowywania sygnalizatora zagrożenia wywróceniem pojazdu.

Tabela 1. Parametry wymiarowe pojazdu

Parametr	Jednostka	Pojazd rzeczywisty
m	kg	2900
m _s	kg	2600
l _f	m	1,885
l _r	m	1,015
L	m	2,9
h	m	1,014
h _s	m	0,31
B	m	1,63
I _{xx}	kgm ²	990
I _{zz}	kgm ²	5241
I _{zx}	kgm ²	0
C _{of}	N/rad	75700
C _{or}	N/rad	83700
K _φ	Nm/rad	219200
D _φ	Nms/rad	19000
C _{ozf}	N/m	630000
C _{oxf}	N/m	259000
C _{ozr}	N/m	630000
C _{oxr}	N/m	259000
C _{z_f}	N/m	73380
C _{z_r}	N/m	98770

Obecnie, zbudowano mobilne modele w skali 1:5, o zmiennych parametrach (rozstaw osi, napęd 4×2, 4×4, zawieszenia niezależne obu osi, zawieszenia zależne osi przedniej lub/i tylnej, możliwość dowolnej zmiany parametrów masowych i bezwładnościowych) oraz szereg stanowisk pozwalających na wyznaczanie parametrów modelu i jego charakterystyk, np. opon, zawieszek, osi przechyłu itp.

Kompletacja modelu wynika z kryteriów podobieństwa, zachowane powinny być nie tylko parametry geometryczne ale i również kinematyczne związane z prędkością liniową i kątową ruchu pojazdu i jego nadwozia, czasem wykonywania poszczególnych manewrów. Zachowanie ich wymagało zbudowania szeregu stanowisk pozwalających na wyznaczenia położenia środka masy pojazdu, momentów bezwładności modelu względem trzech osi czy też parametrów sztywności zawieszek i opon.

Kolejnym problemem było zapewnienie sterowania modelem pozwalającego na spełnienie warunków podobieństwa. Trudnością okazało się to, że manewry wykonywane przez model zgodnie z warunkami podobieństwa powinny przebiegać w krótszym czasie, co oznacza, że precyzyjne kierowanie modelem staje się bardzo trudne. W tym celu opracowano i wykonano automatyczny układ sterujący, pozwalający na programowanie ruchu i realizację założonego ruchu pojazdu.

Tabela 2. Parametry bezwymiarowe pojazdu

Parametr Π	Sposób wyznaczenia	Pojazd rzeczywisty
Π1	l _f /L	0,65
Π2	l _r /L	0,35
Π3	C _{of} ·L/m/U ²	0,392
Π4	C _{or} ·L/m/U ²	0,434
Π5	I _{zz} /m/L ²	0,215
Π6	h/L	0,349
Π7	B/L	0,562
Π8	I _{xx} /m/L ²	0,041
Π9	I _{yy} /m/L ²	0,223
Π10	m _s /m	0,896
Π11	(h-h _s)/L	0,242
Π12	I _{xzo} /m/L ²	0,0059
Π13	K _φ /m/U ²	0,392
Π14	D _φ /m/U/L	0,162
Π15	C _{ozf} ·L ² /m/U ²	9,47
Π16	C _{oxf} ·L ² /m/U ²	3,89
Π17	C _{ozr} ·L ² /m/U ²	11,57
Π18	C _{oxr} ·L ² /m/U ²	4,01
Π19	C _{z_f} ·L ² /m/U ²	1,103
Π20	C _{z_r} ·L ² /m/U ²	1,48

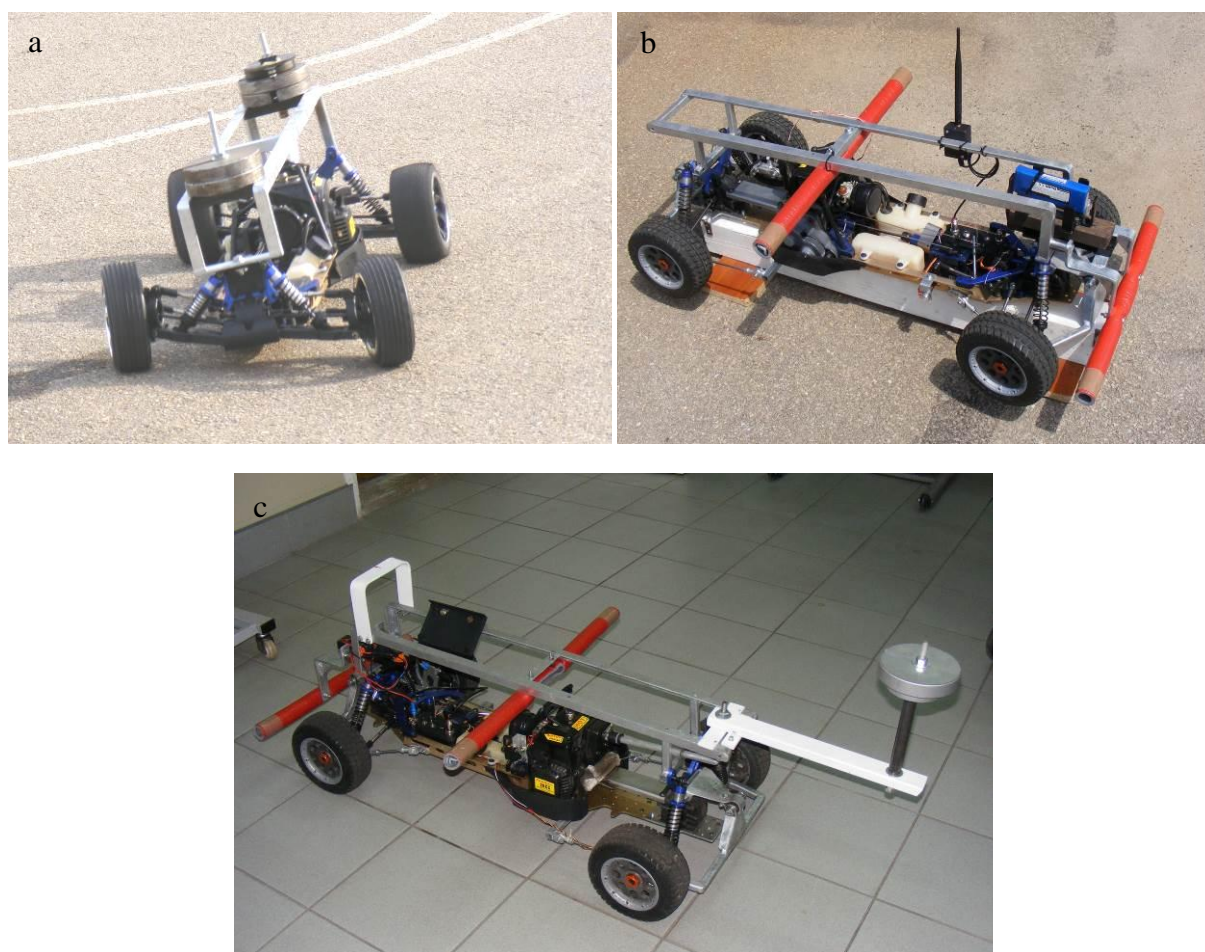
W tabelach 1 i 2 zestawiono parametry samochodu ciężarowego w układzie wymiarowym i bezwymiarowym.

Na podstawie zestawionych powyżej parametrów wyznaczane są wymiary, masy momenty bezwładności modelu, dobierane jest zawieszenie i opony.

W celu zachowania warunków podobieństwa w stosunku do pojazdu rzeczywistego przeprowadzono szereg modyfikacji modelu. Obejmowały one między innymi zwiększenie rozstawu osi, zmianę położenia środka ciężkości i masowych momentów bezwładności, zmianę zawiesznień zarówno osi

przedniej jak i tylnej z oryginalnych, niezależnych na zależne, zmianę obręczy kół i opon na opony o wymiarach i charakterystykach zbliżonych do opon samochodu rzeczywistego. Przeprowadzono też szereg modyfikacji układu napędowego. Do ramy modelu samochodu zamocowano dodatkową ramę górną wraz ze zderzakiem i pałąkiem antykabotażowym, pozwalającą na umieszczanie urządzeń dodatkowych, obciążników oraz aparatury pomiarowej.

Pojazd wykonano dla dwóch stanów obciążeń charakteryzowanych przez masę całkowitą.



Rys. 2. Model pojazdu: wersja 1 (a), wersja 2 (b), wersja 3 (c)

W tabeli 3 zestawiono dane techniczne modelu przed i po modyfikacjach, przy czym wersja 1 nie została poddana badaniom, w związku z tym nie zamieszczono jej parametrów w tabeli.

Tabela 3. Dane modelu przed i po modyfikacjach.

L.p.	Dane	Jedn.	Wersja przed zmianami	Wersja zmodyfikowana	
				wersja 2	wersja 3
1	Długość	m	0,825	0,99	1,250
2	Szerokość	m	0,480	0,480	0,480
3	Wysokość	m	0,250	0,280	0,390
4	Rozstaw osi	m	0,610	0,760	0,760
5	Rozstaw kół	m	0,420	0,420	0,420

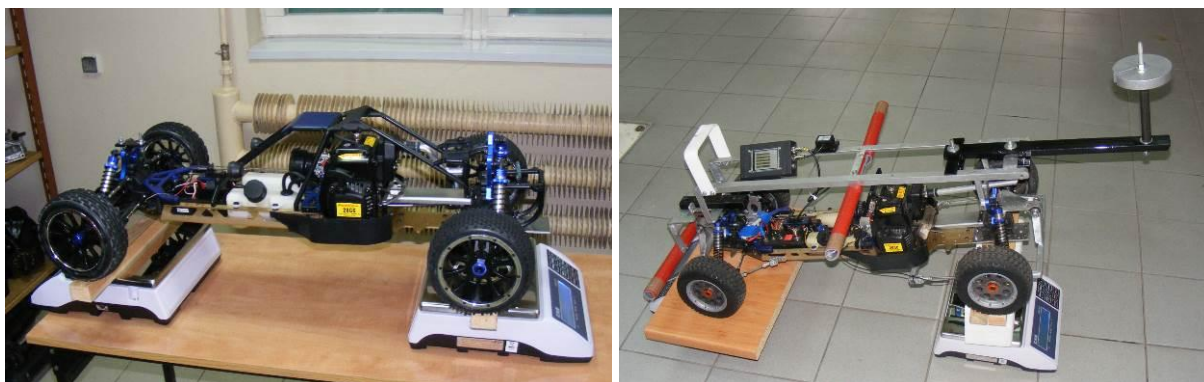
6	Masa modelu	kg	12,50	34,226	26,30
7	Nacisk na oś przednią	N	53,263	156,46	102,57
8	Nacisk na oś tylna	N	70,061	178,96	162,12
9	Odległość środka ciężkości od osi przedniej l_f	m	0,352	0,405	0,477
10	Odległość środka ciężkości od osi tylnej l_r	m	0,268	0,355	0,283
11	Położenie środka masy h	m	0,120	0,218	0,261
12	Moment bezwładności	kgm ²	0,9395	5,052	5,236
13	Silnik	-	Spalinowy, dwusuwowy firmy HIMOTO o pojemności 26 / 30 cm ³		
14	Skrzynka przekładniowa	-	2 pary kół zębatach o przełożeniu 1,517 (35/25 i 26/24)	2 pary kół zębatach o przełożeniu 1,971 (58/32 i 26/24)	
15	Przekładnia centralna	-	Przekładnia stożkowa o zębach łukowych, przełożenie 3,0		
16	Układ napędowy	-	4x4	4x2 przekazywany na oś tylną	
17	Przekładnie główne	-	Przekładnia stożkowa o zębach łukowych, przełożenie 3,0		
18	Układ kierownicy	-	Drażki poprzeczne 3szt. i drążek podłużny		
19	Zawieszenie przednie	-	Podwójne wahacze poprzeczne	Sztynny most	
20	Zawieszenie tylne	-	Podwójne wahacze poprzeczne	Sztynny most	
21	Tarcze kół	-	Tarcze kół z tworzywa o wymiarach 125X60 i 130X70	Tarcze kół z tworzywa o wymiarach 110X60	
22	Ogumienie	-	Z wkładkami usztywniającymi o wymiarze przód 176x65, tył 170x75	Z wkładkami usztywniającymi 190/60 / Pneumatyczne bieżnik Desert Buster HD	

Zmiana parametrów modelu, wymuszona kryteriami podobieństwa, wymagała ich pomiaru i budowy szeregu stanowisk, na których określone są charakterystyki zawieszonych, opon, czy wyznaczane momenty bezwładności [14].

Stanowiska do badań charakterystyk modelu

Masa i momenty bezwładności

Ustalenie wartości parametrów takich jak masa, długość, położenie środka ciężkości jest stosunkowo proste. Do tego celu wykorzystano wagi oraz podporę.



Rys. 3. Pomiar mas i wysokości środka masy pojazdu

Jedną z osi pojazdu umieszczano na podporze i wyznaczano różnicę wartości nacisków przy ustawieniu poziomym i pochylonym obiektu.

W celu wyznaczenia masowego momentu bezwładności, wykorzystano wahadło skrętne (rys. 4).

Jest to pozioma okrągła platforma zawieszona na 3 równej długości nitkach, tak by uzyskać równy naciąg każdej z nich. Mobilny model pojazdu był w taki sposób zamontowany na platformie by jego środek masy znajdował się na środku platformy.

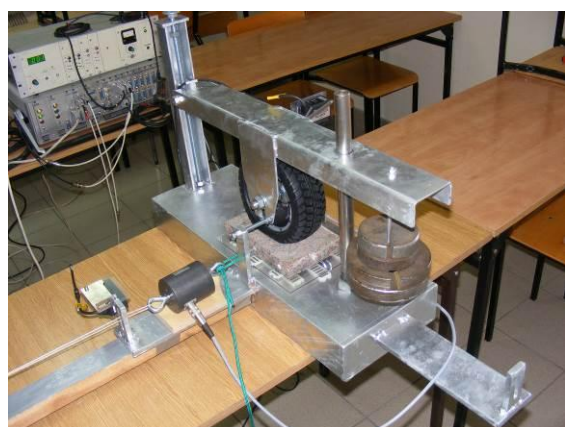
Po wprowadzeniu w ruch platformę wyznaczono okres oscylacji.

Sztwność opon

Sztwności opon pomierzono na specjalnych stanowiskach, które pozwalały na statyczny pomiar sztywności promieniowej, bocznej i wzdłużnej (rys. 5) a także na pomiar sztywności kątowej opon (rys. 6).



Rys. 4. Pomiar momentów bezwładności mobilnego modelu pojazdu



Rys. 5. Pomiar charakterystyk statycznych opon modelu na stanowisku do badań statycznej sztywności opon C_{ox} , C_{oy} , C_{oz}



Rys. 6. Pomiar sztywności kątowej C_{α} opony modelu na bieżni do badań opon

Sztwności i tłumienia zawiesz

Sztwności i tłumienie kątowe zawiesz uzyskano przez wprowadzenie w ruch drgający model wokół osi przechyłu, a następnie rejestrując zanik oscylacji. Na fotografii 7 pokazano sposób pomiaru tych parametrów.

Parametry układu kierowniczego

Na podstawie pomiarów ustalono przełożenie w układzie kierowniczym w zależności od ustawień sterownika (kierownicy, pokręta kierowniczego i zadanych wartości sterowania przez automatyczny sterownik – rys. 8).



Rys. 7. Pomiar sztywności przechyłowej K_ϕ oraz tłumienia D_ϕ zawieszek



Rys. 8. Pomiar kątów skrętu kół δ_k

4. Rodzaje badań możliwych do przeprowadzenia na modelach pojazdów w skali

Mobilne modele pojazdów pozwalają na przeprowadzenie badań na podobnych do prowadzonych na poligonach badawczych opisanych normami ISO. Mogą to być również badania pojazdów w terenie nieutwardzonym, czy w warunkach dowolnie określonych przez prowadzącego badania. Modele mogą być wykorzystywane również w testach kończących się przewróceniem pojazdu, prowadzących do określenia granicznych warunków jego użytkowania [10,13].

W zasadzie najszerszy wachlarz badań można prowadzić wykonując większość manewrów opisanych w normach ISO [5,19]. Do najczęściej stosowanych testów badawczych w zakresie stateczności i kierowności pojazdów należą:

- ustalony ruch po okręgu, wg ISO 4138, ISO 14792 (pojazdy ciężarowe),
- manewr podwójnej zmiany pasa ruchu, wg ISO 3888,
- manewr pojedynczej zmiany pasa ruchu wg GOST P. 52302.2003,
- manewr wymuszenia skokowego z liniowym narastaniem kąta obrotu koła kierownicy, wg ISO 7401, ISO 14793 (pojazdy ciężarowe),

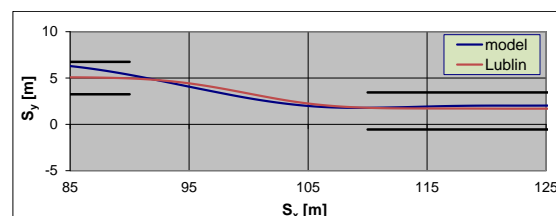
- manewr wymuszenia w postaci jednego okresu sinusoidy (w efekcie zazwyczaj manewr pojedynczej zmiany pasa ruchu), wg ISO 7401, ISO 14793 (pojazdy ciężarowe),
- manewr wymuszenia sinusoidalnego ciągłego, wg ISO 7401, ISO 14793 (pojazdy ciężarowe),
- manewr wymuszenia impulsowego, wg ISO 7401, ISO 14793 (pojazdy ciężarowe),
- manewr wymuszenia losowego wg ISO 7401, ISO 14793 (pojazdy ciężarowe),
- manewry opracowane przez NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration):
- manewr ustalonego przyrostu skrętu SIS (Steadily Increasing Steer),
- manewr J-turn,
- manewr fishhook.

Badania mogą również dotyczyć układów wspomagania kierowcy takich jak ABS, układ stabilizacji toru jazdy, aktywne mechanizmy różnicowe a także poszczególnych mechanizmów i zespołów pojazdu oraz badania podstawowe dotyczące wpływu rozkładu mas, oporów toczenia, skrętu czy współpracy koła z miękkim podłożem [4,9,18,25].

5. Transformacja wyników i wnioskowanie o ruchu pojazdu rzeczywistego

Wyniki badań mobilnego modelu są przeliczane na wartości bezwymiarowe a następnie na układ wielkości dla pojazdu rzeczywistego. To pozwala na określenie parametrów ruchu rzeczywistego pojazdu podczas wykonywania zadanych manewrów. Na rysunkach pokazano porównanie ruchu pojazdu rzeczywistego i modelu podczas wykonywania poszczególnych manewrów.

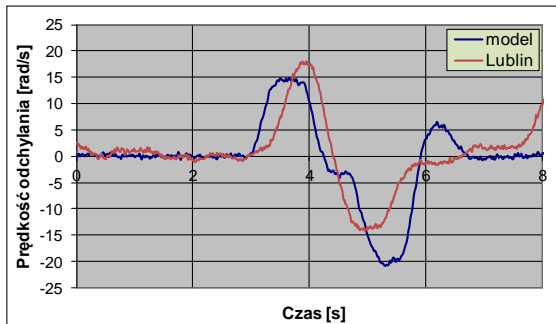
Poniżej przedstawiono porównanie czterech manewrów wykonanych przez pojazd rzeczywisty i mobilny model: pojedynczą zmianę pasa ruchu, jazdę po okręgu, manewr wymuszenia skokowego ze stopniowym narastaniem kąta obrotu kierownicy i manewr wymuszenia w postaci jednego okresu sinusoidy. Podczas wykonania manewrów były mierzone prędkości wzdłużna i poprzeczna, przyspieszenia: wzdłużne, poprzeczne, prędkości katowe obrotów wokół środka ciężkości pojazdu oraz tor ruchu pojazdu.



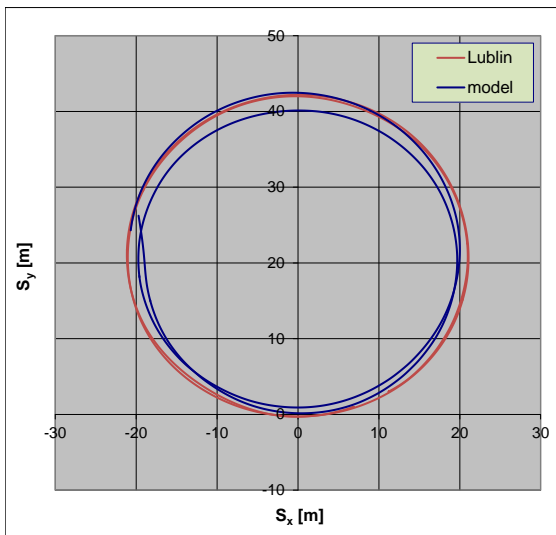
Rys. 9. Trajektoria ruchu pojazdów w teście „zmiana pasa ruchu”

Na wykresach przedstawiono tory ruchu pojazdów oraz prędkości odchylenia dla prób: pojedynczej zmiany pasa ruchu, jazdy po okręgu, „szarpnięcia

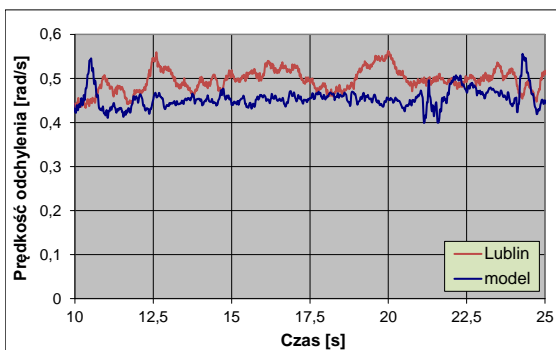
kierownicą” - wymuszenia skokowego z liniowym narastaniem kąta obrotu koła kierownicy i „sinusoidy” - wymuszenia w postaci jednego okresu sinusoidy.



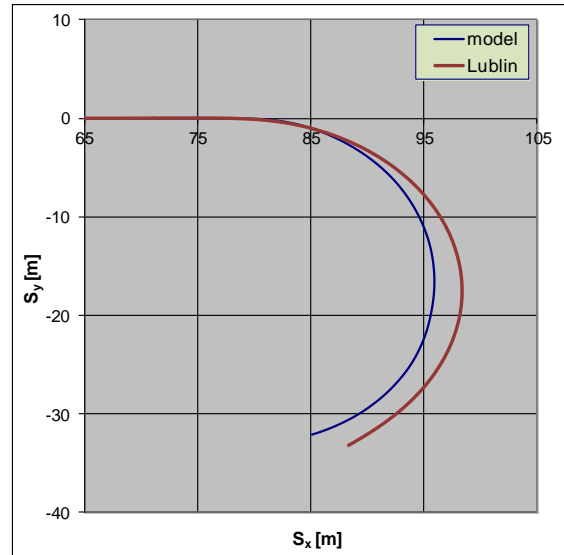
Rys. 10. Prędkość odchylenia pojazdów w teście „zmiana pasa ruchu”



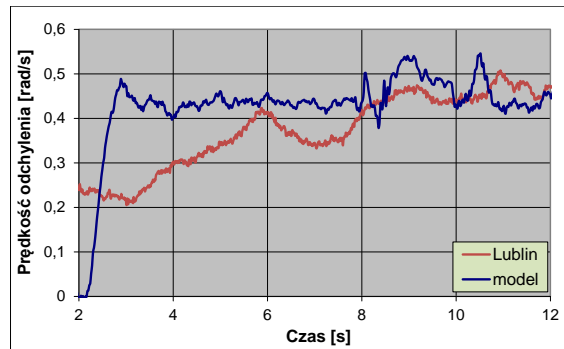
Rys. 11. Trajektoria ruchu pojazdów w teście „jazda po okręgu”



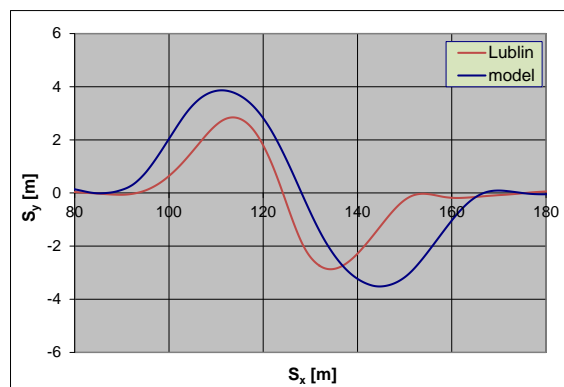
Rys. 12. Prędkość odchylenia pojazdów w teście „jazda po okręgu”



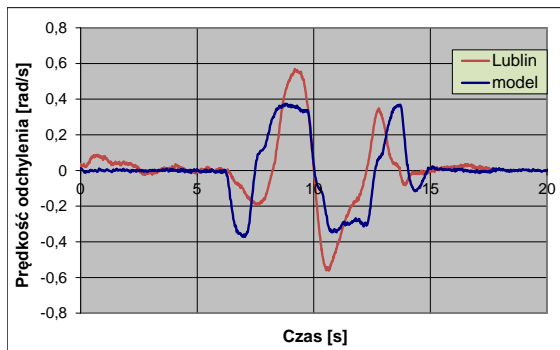
Rys. 13. Trajektoria ruchu pojazdów w teście „szarpnięcie kierownicą”



Rys. 14. Prędkość odchylenia pojazdów w teście jazdy po torze typu „szarpnięcie kierownicą”



Rys. 15. Trajektoria ruchu pojazdów w teście jazdy po torze typu „sinusoida”



Rys. 16. Prędkość odchylenia pojazdów w teście jazdy po torze typu „sinusoida”

6. Wnioski

Wyniki badań mobilnego modelu pozwalają na stwierdzenie, że istnieje wystarczająca zgodność parametrów ruchu modelu i pojazdu rzeczywistego. Pomimo widocznych różnic na wykresach tego typu stwierdzenie jest uzasadnione. Różnice pokazane powyżej wynikają z trudności dokładnego przeniesienia parametrów pomiarów modelu na

pojazd rzeczywisty i są związane z precyzją sterowania modelem.

O ile programowanie sterowania wymaga dostrojenia, to nawet przy istniejących różnicach torów jazdy, modelu i pojazdu, zgodność jest wystarczająca i pozwala na przeniesienie wyników badań z modelu na pojazd rzeczywisty. Co więcej badania prowadzone przy wykorzystaniu modelu pozwalają na rozszerzenie zakresu badań nawet na zakres badań niebezpiecznych, grożących wywróceniem a także niemożliwych do przeprowadzenia. Pozwala również na szybkie dokonywanie zmian w modelu i prowadzenie badań wpływu modyfikacji na zachowanie się pojazdu. Mogą być prowadzone badania układów pojazdu polegające na doborze ich parametrów lub programowaniu sterowników.

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”.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

m	masa	$C_{\phi f}$	sztywność kątowna opony osi przedniej
m_s	masa resorowana	$C_{\phi r}$	sztywność kątowna opony osi tylnej
l_f	odległość środka masy od osi przedniej	K_{ϕ}	współczynnik sztywności przechyłu nadwozia
l_r	odległość środka masy od osi tylnej	D_{ϕ}	współczynnik tłumienia przechyłu nadwozia
L	rozstaw osi	$C_{\phi f}$	sztywność promieniowa opony koła przedniego
h	wysokość środka masy	$C_{\phi f}$	sztywność wzdłużna opony koła przedniego
h_s	wysokość osi przechyłu	$C_{\phi r}$	sztywność promieniowa opony koła tylnego
B	rostaw kół	$C_{\phi r}$	sztywność wzdłużna opony koła tylnego
I_{xx}	masowy moment bezwładności względem osi X	$C_{\phi f}$	sztywność zawieszenia koła przedniego
I_{zz}	masowy moment bezwładności względem osi Z	$C_{\phi r}$	sztywność zawieszenia koła tylnego
I_{zx}	masowy moment bezwładności względem płaszczyzny XZ	δ_k	kąt skrętu koła

Bibliography/Literatura

- [1] Brennan S., Similarity conditions for comparing closed-loop vehicle roll and pitch dynamics, in Proc. Amer. Control Conf., vol. 4, Boston, MA, June 2004, pp. 3393{3398}.
- [2] Buckingham E., On physically similar systems: Illustration of the use of dimensional equations. Physics Review, (4):345 – 376, 1914.
- [3] Gillespie T. D.: Fundamentals of Vehicle Dynamics: SAE, Warrendale, 1992.
- [4] Grzegożek W. Modelowanie dynamiki samochodu przy stabilizującym sterowaniu siłami hamowania. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej Monografia 275, Kraków 2000.
- [5] Lozia Z. Guzek M. Przegląd metod badań stateczności i kierowności pojazdów samochodowych, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 3(14)/1995.
- [6] Lozia Z. Ocena odporności pojazdu na przewrócenie na bok – wpływ stopnia skomplikowania modelu na wyniki obliczeń, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 3(79)/2010,
- [7] Orzełowski S., Eksperymentalne badania samochodów i ich zespołów. WNT Warszawa 1995.
- [8] Pacejka H. B., Tire and Vehicle Dynamics. Warrendale, PA: SAE Press, 2002.
- [9] Parczewski K., Wnęk H. Analiza wpływu parametrów masowych na stateczność ruchu

- samochodu ciężarowego w oparciu o badania mobilnego modelu pojazdu. Postępy Nauki i Techniki, SIMP 2012; 14: 208-223.
- [10] Parczewski K., Wnęk H.: A investigation of vehicles resistance to rollover. – rozdział w monografii Automotive safety problems pod redakcją L. Stańczyka, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2012. p 1-14.
- [11] Parczewski K., Wnęk H.: Modele fizyczne pojazdów w skali do badania dynamiki ruchu. Czasopismo Techniczne 2012 z.8. s. 35-46.
- [12] Parczewski K., Wnęk H.: Pomiar sztywności kątowej zawieszenia samochodu. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2010 Vol. 56 nr 3. s. 236-239.
- [13] Parczewski K., Wnęk H.: The attempt to use the car model to the analysis of the vehicle movement after the curvilinear track, Transactions of the Universities of Košice 2009 [nr] 3. s. 117-120.
- [14] Parczewski K., Wnęk H.: Wykorzystanie kryteriów podobieństwa do analiz stateczności ruchu na podstawie mobilnego modelu samochodu ciężarowego, Logistyka 2012, [nr] 3. s. 1797-1805.
- [15] Parczewski K., Wnęk H.: Using mobile scaled vehicle to investigate the truck lateral stability. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Lublin 2013.
- [16] Parczewski K., Wnęk H.: Utilization of the car model to the analysis of the vehicle movement after the curvilinear track. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Lublin 2010 Vol. 8 [nr] 4. s. 37-46.
- [17] Parczewski K.: Effect of tyre inflation pressure on the vehicle dynamics during braking manoeuvre. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Lublin 2013.
- [18] Parczewski K., Wnęk H.: Wykorzystanie przyczepności podczas hamowania pojazdu. Eksploatacja i Niezawodność, Lublin 2012 Vol. 14 [nr] 2. s. 176-180.
- [19] Pieniążek W. Wybrane zagadnienia badania stateczności i kierowności samochodów, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 3(79)/2010.
- [20] Siedow L. I.: Analiza wymiarowa i teoria podobieństwa w mechanice, WNT, Warszawa, 1968.
- [21] Sonin A. A. The Physical Basis of Dimensional Analysis, Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge, 2001.
- [22] Romaniszyn K. M.: Driving stability of vehicle with high center of gravity during road tests on a circular path and single lane-change. Journal of KONES. Powertrain and Transport, Vol. 16, Warsaw 2009, str. 419-429.
- [23] Romaniszyn K. M.: Mobilne modele samochodów do badań stateczności, Logistyka 3/2012.
- [24] Romaniszyn K. M., Wnęk H. Symulacja dynamiki ruchu na mobilnym modelu samochodu. Pomiary Automatyka Kontrola, 3/2010, str. 240-243.
- [25] Romaniszyn K. M.: Porównanie cech dynamicznych samochodu specjalnego przy różnych położeniach środka ciężkości. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 1(77)/2010, str. 279-291.
- [26] Romaniszyn K. M.: Stateczność ruchu samochodów specjalnych. Zeszyty Naukowe BOSMAL, nr 44 (II-IV/2009) str. 47-55.

Mr Krzysztof Parczewski, DEng. – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of Bielsko-Biala.

Dr inż. Krzysztof Parczewski – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.



Mr Henryk Wnęk, DEng. – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of Bielsko-Biala.

Dr inż. Henryk Wnęk – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

