

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THREE-AXLE VEHICLE SIMULATION MODEL

**Zbigniew Lozia**

*Warsaw University of Technology  
Faculty of Transport  
Koszykowa Street 75, 00-662 Warsaw, Poland  
tel.: (+48 22) 6608246, fax: (+48 22) 849 03 21  
e-mail: lozia@it.pw.edu.pl*

**Przemysław Simiński**

*Military Institute of Armour and Automotive Technology  
Okuniewska Street 1, 05-70 Sulejówek, Poland  
tel.: (+48 22) 6811204, fax: (+48 22) 6811073  
e-mail: psim@witpis.mil.pl*

### **Abstract**

*The growing density of real estate developments in municipal areas of the European countries effected over the past few years in a more intensive traffic of heavy commercial vehicles, travelling through narrow and sinuous street of the cities. In urban areas with high density of real estate developments, the traffic of heavy commercial vehicles with heavy and medium-sized load capacity very often faces serious difficulties due to a large turning radius of those truck. The paper presents results of three-axle vehicle simulation model experimental verification. Simulation as well as experimental tests based on manoeuvres recommended by ISO. The same excitation was applied in both cases. Time histories of the output data (longitudinal and lateral acceleration, yaw velocity, longitudinal velocity and travelled distance) were compared. The results show that simulation model quite well describes properties of real truck.*

**Keywords:** vehicle, experimental verification, simulation model, manoeuvrability, turning radius

## WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA MODELU POJAZDU TRZYOSIOWEGO DO BADAŃ ZWROTNOŚCI, DYNAMIKI I RUCHU

### **Streszczenie**

*W ostatnich kilku latach można zaobserwować narastającą intensywność ruchu pojazdów na terenach zurbanizowanych europejskich miast, szczególnie utrudnione jest manewrowanie na krętych miejskich ulicach. Na terenach miejskich z coraz bardziej gęstniejącym ruchem ulicznym, szczególne trudności mają pojazdy ciężarowe dużej i średniej ładowności, co jest związane ze zbyt dużym minimalnym promieniem skrętu, osiąganym przez te samochody. Artykuł prezentuje wyniki badań eksperymentalnych modelu symulacyjnego pojazdu trzyosiowego. Badania symulacyjne oraz eksperymentalne przeprowadzono w oparciu o testy rekomendowane przez normy ISO. Takie same wymuszenia stosowano w obu przypadkach. Przebiegi czasowe danych wyjściowych (przyspieszenie wzdłużne i poprzeczne, prędkość wzdłużna, przyspieszenie wzdłużne oraz przemieszczenie) były porównywalne. Wyniki pokazują, że model symulacyjny dosyć dobrze odzwierciedla własności obiektu rzeczywistego.*

**Słowa kluczowe:** pojazd, weryfikacja eksperymentalna, model symulacyjny, zwrotność, promień skrętu

### **1. Wstęp**

Obserwacja samochodów ciężarowych wykorzystywanych w sektorach: przemysłu (kopalnie, budowy), służb ratowniczych (straż pożarna, pojazdy ewakuacji technicznej), wojskowym, wykazała że dla tego typu pojazdów zwrotność jest istotnym parametrem i jej polepszenie może jednocześnie poprawić ich efektywność w wykonywaniu zadań zgodnych z

przeznaczeniem. W celu badania ruchu samochodu trzyosiowego zbudowano model symulacyjny. Aby uzyskać informację o wiarygodności otrzymywanych w wyniku symulacji wyników, przeprowadzono badania weryfikujące zbudowany model matematyczny.

## 2. Model matematyczny

Zbudowano model matematyczny opisywany 9 współzrędnymi uogólnionymi. Model uzupełniają równania algebraiczne i różniczkowe opisujące: reakcje normalne drogi, siły w kontakcie koła ogumionego z podłożem (w tym stany nieustalone), własności układu kierowniczego. Model był szerzej opisywany w pracach [1, 6].

## 3. Program symulacyjny

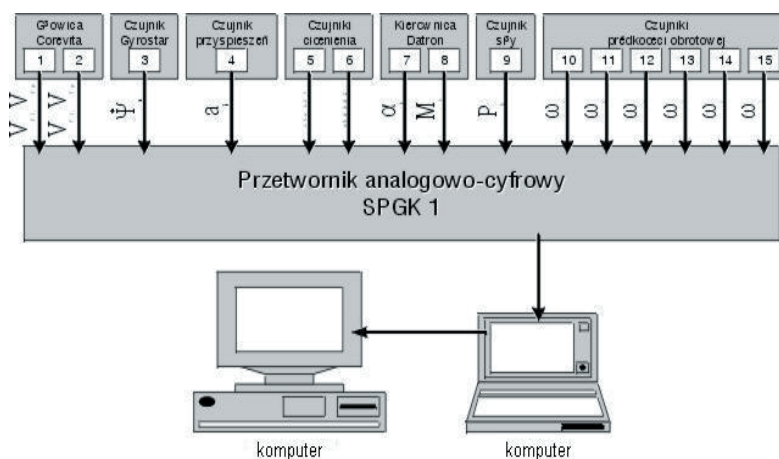
Dla przeprowadzenia symulacji ruchu pojazdu z wykorzystaniem zaprezentowanego wyżej modelu, zbudowano program o nazwie *PSSYMTO*. Do tego celu wykorzystano środowisko *MATLAB*, w tym interaktywny pakiet przeznaczony do modelowania *SIMULINK*, w którym zdefiniowano model [6].

## 4. Badania eksperymentalne służące weryfikacji modelu symulacyjnego

Aby uzyskać informację o wiarygodności otrzymywanych w wyniku symulacji wyników, przeprowadzono badania weryfikujące zbudowany model matematyczny. Do tego celu zgromadzono i wykorzystano niezbędną aparaturę pomiarową, którą stanowiły:

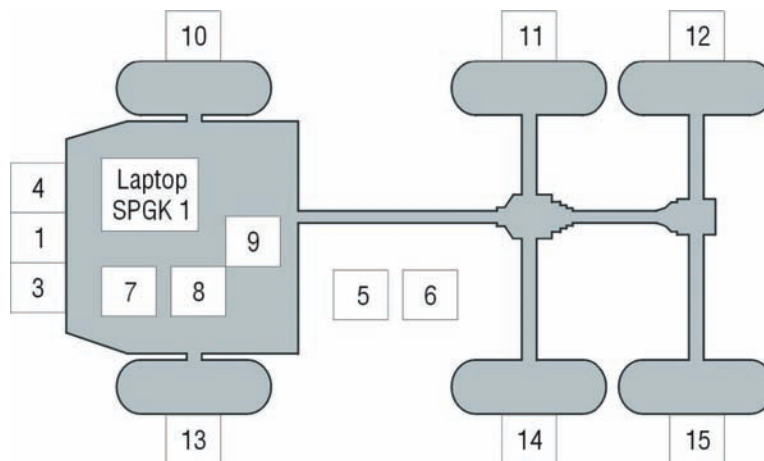
- przetwornik analogowo-cyfrowy SPGK-1,
- komputer sterująco-rejestrujący,
- czujnik przyspieszeń – 1 szt.,
- kierownica pomiarowa firmy Datron-MSW1 – do pomiaru kąta obrotu kierownicy oraz momentu na kole kierownicy,
- głowica do pomiaru prędkości podłużnej i poprzecznej Datron V1/S – 2 szt.,
- czujnik prędkości odchylenia pojazdu Gyrostar – 1 szt.,
- czujnik do pomiaru ciśnienia w układzie hamulcowym Peltron – 2 szt.,
- czujnik kąta obrotu przetwornik impulsowy Introl – 6 szt.,
- czujnik tensometryczny siły do pomiaru siły na pedale hamulca – 1 szt.,
- zasilacze,
- okablowanie,
- taśma miernicza.

Schemat blokowy aparatury wykorzystanej do badań pokazano na rys. 1. Analizy sygnałów dokonano z wykorzystaniem stacjonarnego komputera, za pomocą zbudowanego w tym celu (w środowisku *MATLAB*) oprogramowania.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego  
Fig. 1. Measurement system scheme

Rozmieszczenie czujników w pojeździe (opisanych na rys. 1) pokazano na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników pomiarowych  
Fig. 2. Location of measurement sensors



Rys. 3. Obiekt badań eksperymentalnych – trzyosiowy samochód ciężarowy  
Fig. 3. Object of experimental tests - three-axial truck

Badania drogowe poprzedzono pomiarami rozkładu mas na osie i strony pojazdu z wykorzystaniem wag będących na wyposażeniu Laboratorium Badań Pojazdów WITPiS. Badania drogowe wykonano na prostym odcinku drogi o suchej, betonowej nawierzchni. Wszystkie wyniki rejestrowane były z częstotliwością próbkowania 50 Hz lub 100 Hz. Następnie poddano je filtracji dolnoprzepustowej.

##### 5. Weryfikacja eksperymentalna modelu symulacyjnego ruchu i dynamiki trzyosiowego pojazdu kołowego

Do weryfikacji eksperymentalnej zbudowanego modelu symulacyjnego wybrano trzy testy z grupy zalecanych przez ISO:

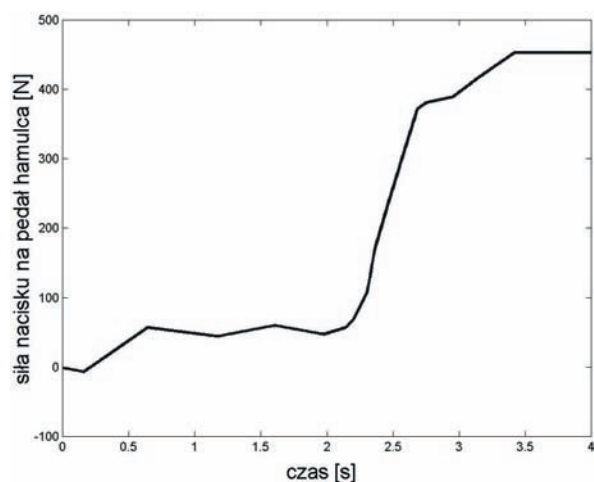
- hamowanie prostoliniowe [3],
- ustalony ruch po okręgu [4],
- manewr z wymuszeniem skokowym na kole kierownicy z liniowym okresem narastania [5].

Testy przeprowadzono według zaleceń wspomnianych norm ISO. Pewne odstępstwa były konieczne ze względu na specyficzny rodzaj obiektu badanego, rozmiar odcinków pomiarowych oraz bezpieczeństwo uczestników. Wyniki badań eksperymentalnych

porównano z badaniami symulacyjnymi, dla warunków i wymuszeń takich jak w eksperymencie, poprzez zestawienie ich na wykresach.

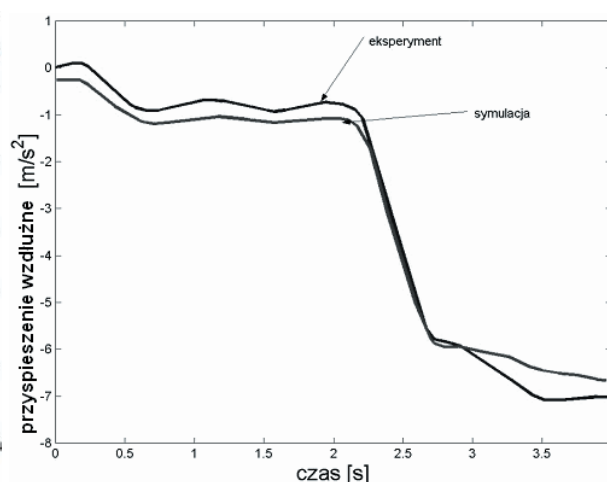
### 5.1. Wyniki weryfikacji eksperymentalnej dla hamowania prostoliniowego (norma ISO 6597 [3])

W trakcie hamowania prostoliniowego wymuszeniem była siła nacisku na pedał hamulca. Przebieg siły nacisku pochodzący z eksperymentu (np. rys. 4). wykorzystano w niezmienionej postaci do symulowania hamowania prostoliniowego. Na rys. 5÷7 przedstawiono wyniki jednej z czterech prób. Są to przebiegi czasowe przyspieszenia wzdłużnego, prędkości pojazdu i przemieszczenia wzdłużnego środka masy pojazdu.



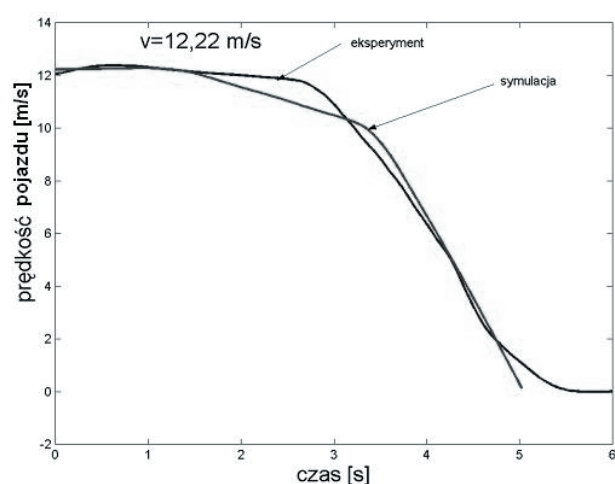
Rys. 4. Przebieg czasowy siły nacisku na pedał hamulca trakcie symulacji oraz eksperymentu

Fig. 4. Time histories of force on break pedal (simulation and experiment)

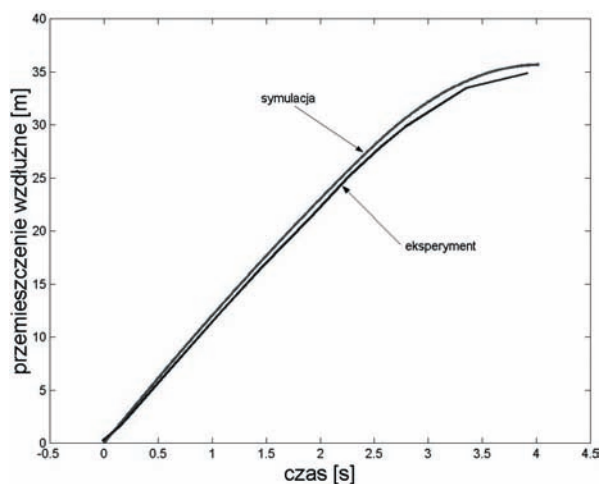


Rys. 5. Przebieg czasowy przyspieszenia wzdłużnego  
Fig. 5. Longitudinal acceleration time histories

Przebiegi czasowe przyspieszenia wzdłużnego otrzymane w symulacji wykazują dość dobrą zgodność z eksperymentem. Największe różnice wartości przyspieszenia występują w końcowej fazie hamowania, tu różnice sięgają  $1 \text{ m/s}^2$  co stanowi 14,3% osiągniętych wartości.



Rys. 6. Przebiegi czasowe prędkości środka masy pojazdu  
Fig. 6. Time histories of truck CG velocity



Rys. 7. Przemieszczenie wzdłużne środka masy pojazdu w funkcji czasu  
Fig. 8. Time histories of truck CG travelled distance

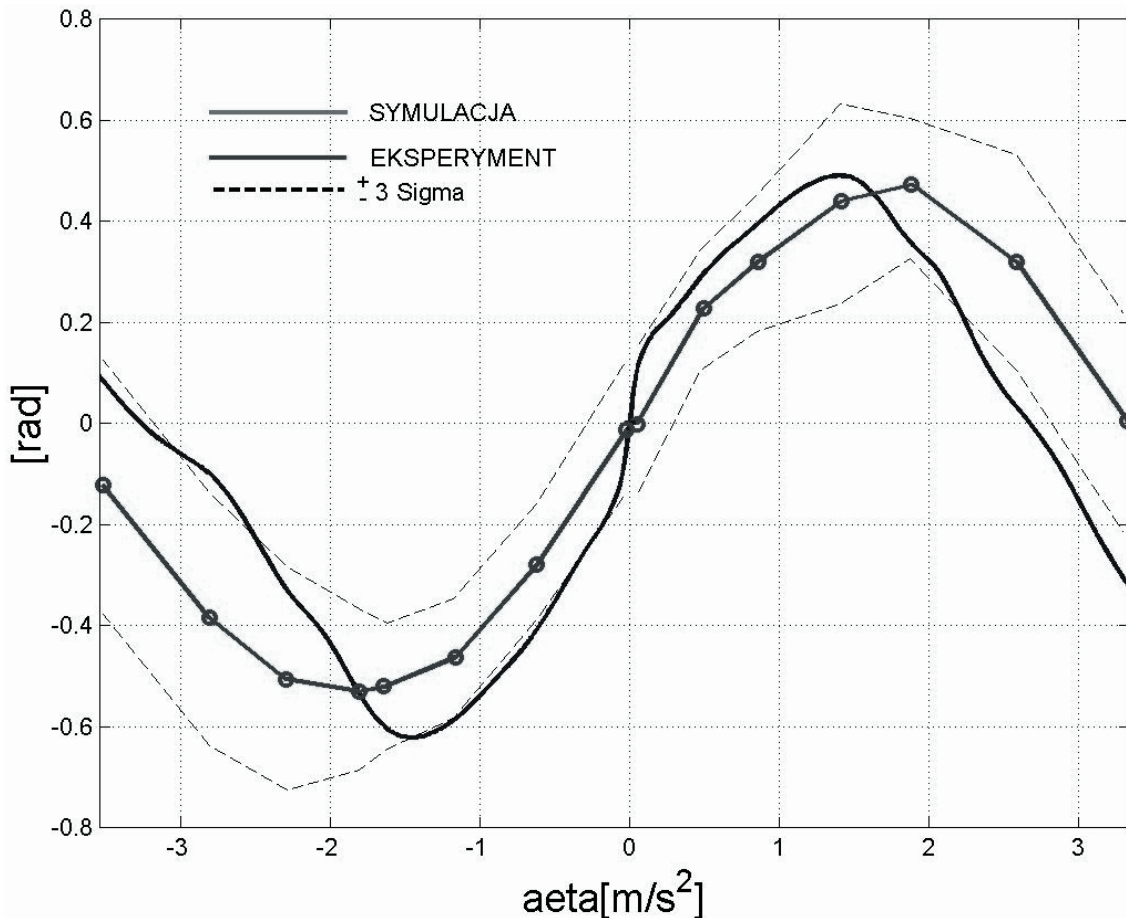
Dobłą zgodność między symulacją i eksperymentem uzyskano także dla przebiegu czasowego prędkości wzdłużnej. Największe różnice występują w przedziale od 1,8 do 2,5 sekundy i sięgają 1 m/s, co stanowi 8,1% osiąganych wartości. Przetwornik optyczny prędkości ma możliwości całkowania zmierzonej prędkości, dzięki temu możliwe było uzyskanie przemieszczenia wzdłużnego środka masy pojazdu. Wyniki porównania przemieszczenia wzdłużnego środka masy wykazują bardzo dobrą zgodność symulacji z eksperymentem (rys. 7). Różnice długości drogi hamowania nie przekraczają 1,9 m dla przypadku hamowania z prędkości 11,75 m/s, co stanowi 4,5% wartości otrzymanej w trakcie badań eksperymentalnych.

Różnice w przyspieszeniu wzdłużnym między symulacją a eksperymentem są większe i dla wartości maksymalnych sięgają 18,7% dla hamowania przy prędkości 11,61 m/s.

## 5.2. Wyniki weryfikacji eksperymentalnej dla ruchu ustalonego po okręgu (norma ISO 4138 [4])

Badania symulacyjne przeprowadzono według jednej z metod zalecanych w pracy [4]. Przy stałej prędkości pojazdu, wynoszącej 19 km/h, zmieniano kąt obrotu kierownicy z prędkością 0,1 rad/s aż do wartości 2,5 rad.

Badania eksperymentalne prowadzono na torze o promieniu 22 m. Zakres prędkości zmieniany był od 4,5 km/h do 28 km/h. Otrzymane wyniki zestawiono na wykresie według wymagań ISO [4]. Na rys. 8 przedstawiono różnice kąta obrotu kierownicy oraz kąta obrotu kierownicy pojazdu Ackermanna w funkcji przyspieszenia poprzecznego.



Rys. 8. Różnica kąta obrotu kierownicy badanego pojazdu oraz kąta obrotu kierownicy odpowiadającemu mu pojazdowi Ackermanna w funkcji przyspieszenia poprzecznego

Fig. 8. Steering-wheel angle minus steering-wheel of Ackermans' vehicle versus lateral acceleration

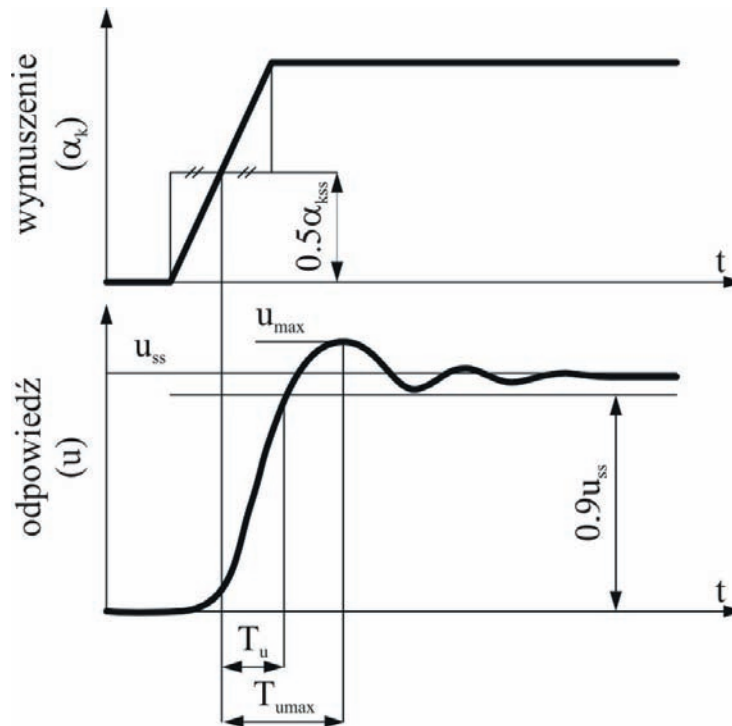
Model dostatecznie dobrze odzwierciedla własności obiektu rzeczywistego. Widoczne jest, że powyżej  $1,5 \text{ m/s}^2$  pojazd staje się nadsterowny. Na rysunku naniesiono także, zgodnie z ogólnie przyjętym sposobem przedstawiania takich wyników [4] linię oznaczającą  $\pm 3$  odchylenia standardowe. Otrzymane wyniki symulacji w większości mieszczą się w tym paśmie. Różnice dla ruchu w lewo oraz w prawo wynikają z położenia środka masy względem płaszczyzny symetrii samochodu oraz niesymetryczności układu kierowniczego.

### 5.3. Wyniki weryfikacji eksperymentalnej dla manewru z wymuszeniem skokowym na kole kierownicy z liniowym okresem narastania (norma ISO 7401 [5])

Badania symulacyjne oraz eksperymentalne przeprowadzono dla jednakowej prędkości oraz wymuszenia na kole kierowniczym. Oprócz zestawienia wyników w postaci wykresu, obliczone niektóre ze wskaźników oceny:

- czasy reakcji przyspieszenia poprzecznego  $T_{a\eta}$ ,  $T_{a\eta\max}$ ;
- czasy prędkości kątowej odchylenia  $T_{\dot{\psi}_1}$ ,  $T_{\dot{\psi}_1\max}$ ;
- współczynniki przewyższenia dynamicznego  $U_{a\eta}$ ,  $U_{\dot{\psi}_1}$ .

Ich sens zilustrowano na rys. 9.



$$U_u = \frac{u_{\max} - u_{ss}}{u_{ss}}. \quad (1)$$

Rys. 9. Graficzne przedstawienie parametrów służących do weryfikacji w teście „wymuszenia skokowego” na kole kierownicy z liniowym okresem narastania

Fig. 9. Graphical representation of transient "step input" test required by ISI 7401 regulation

Na rys. 10 przedstawiono zarejestrowany w trakcie badań eksperymentalnych przebieg czasowy wymuszenia na kole kierownicy. Na rys. 11 porównano wyniki symulacji i eksperymentu: przebiegi czasowe prędkości kątowej odchylenia.

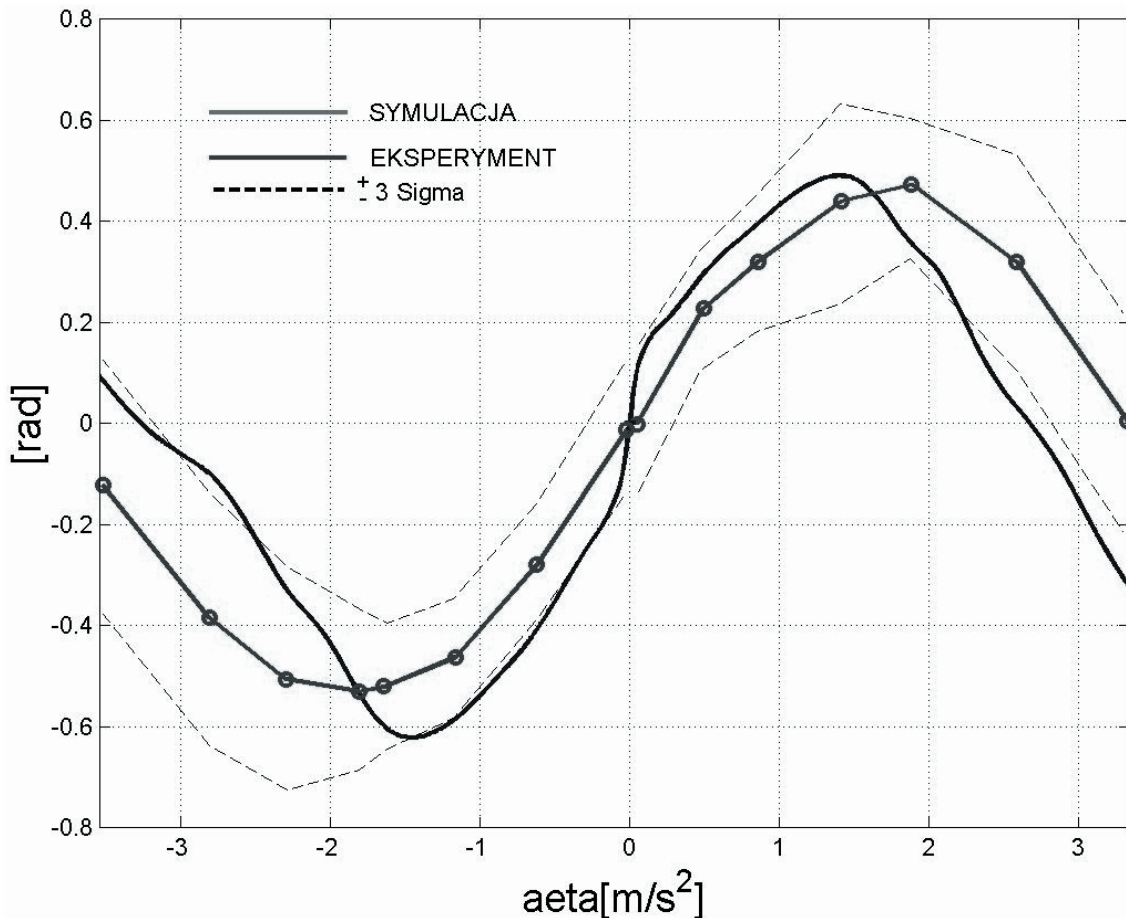
Dobłą zgodność między symulacją i eksperymentem uzyskano także dla przebiegu czasowego prędkości wzdłużnej. Największe różnice występują w przedziale od 1,8 do 2,5 sekundy i sięgają 1 m/s, co stanowi 8,1% osiąganych wartości. Przetwornik optyczny prędkości ma możliwości całkowania zmierzonej prędkości, dzięki temu możliwe było uzyskanie przemieszczenia wzdłużnego środka masy pojazdu. Wyniki porównania przemieszczenia wzdłużnego środka masy wykazują bardzo dobrą zgodność symulacji z eksperymentem (rys. 7). Różnice długości drogi hamowania nie przekraczają 1,9 m dla przypadku hamowania z prędkości 11,75 m/s, co stanowi 4,5% wartości otrzymanej w trakcie badań eksperymentalnych.

Różnice w przyspieszeniu wzdłużnym między symulacją a eksperymentem są większe i dla wartości maksymalnych sięgają 18,7% dla hamowania przy prędkości 11,61 m/s.

## 5.2. Wyniki weryfikacji eksperymentalnej dla ruchu ustalonego po okręgu (norma ISO 4138 [4])

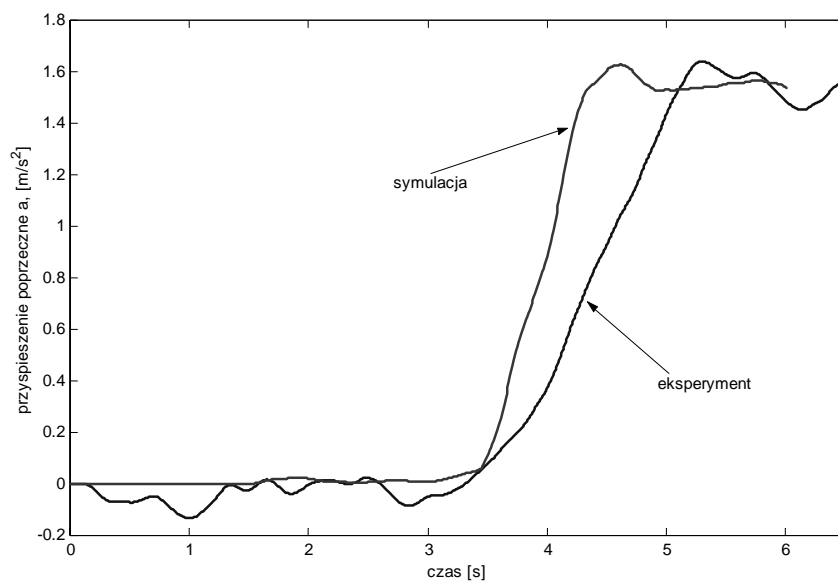
Badania symulacyjne przeprowadzono według jednej z metod zalecanych w pracy [4]. Przy stałej prędkości pojazdu, wynoszącej 19 km/h, zmieniano kąt obrotu kierownicy z prędkością 0,1 rad/s aż do wartości 2,5 rad.

Badania eksperymentalne prowadzono na torze o promieniu 22 m. Zakres prędkości zmieniany był od 4,5 km/h do 28 km/h. Otrzymane wyniki zestawiono na wykresie według wymagań ISO [4]. Na rys. 8 przedstawiono różnice kąta obrotu kierownicy oraz kąta obrotu kierownicy pojazdu Ackermanna w funkcji przyspieszenia poprzecznego.



Rys. 8. Różnica kąta obrotu kierownicy badanego pojazdu oraz kąta obrotu kierownicy odpowiadajacemu mu pojazdowi Ackermanna w funkcji przyspieszenia poprzecznego

Fig. 8. Steering-wheel angle minus steering-wheel of Ackermans' vehicle versus lateral acceleration



Rys. 12. Przebiegi czasowe przyspieszenia poprzecznego  
 Fig 12. Lateral acceleration time histories; simulation and experiment

Wyniki badań symulacyjnych charakteryzują się krótszymi czasami reakcji. Różnice w czasie sięgają 58%.

Porównanie współczynników przewyższenia dynamicznego przyspieszenia poprzecznego pokazuje, że dla symulacji jest on większy o 30% niż dla obiektu rzeczywistego. Dla prędkości kątowej odchylenia współczynnik przewyższenia dynamicznego dla eksperymentu jest 3-krotnie większy niż dla symulacji.

Porównanie wartości maksymalnych oraz wartości w stanie ustalonym przyspieszenia poprzecznego i prędkości kątowej odchylenia wskazuje na bardzo dobrą zgodność, różnice są bardzo małe i nie przekraczają 3%.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzona weryfikacja eksperymentalna modelu symulacyjnego, pozwoliła na określenie jego możliwości odzwierciedlania własności obiektu rzeczywistego. Próby starano się przeprowadzać zgodnie z unormowaniami ISO. Potwierdzają one przydatność modelu do badań kierowności oraz stateczności pojazdów. Zauważone różnice mają mniejsze znaczenie w badaniach przy niskich prędkościach. Zauważone różnice między wynikami symulacji i eksperymentu dotyczą głównie testu wymuszenia skokowego na kole kierownicy z liniowym okresem narastania a więc w warunkach dużej dynamiki ruchu badanego pojazdu.

## Literatura

- [1] Lozia, Z., Simiński P., *Model przeznaczony do badań stateczności ruchu i kierowności trzyosiowego pojazdu kołowego*, Teza Komisji Naukowo-Problemovej PAN, Oddział w Krakowie, Zeszyt 26-27, pp. 235-240.
- [2] Lozia Z., Pieniążek W., *Real Time 7 DOF Vehicle Dynamics Model and its Experimental Verification*, SAE Paper 2002-01-1184.
- [3] Norma ISO 6597, *Straight Line Braking Test* 1988.
- [4] Norma ISO 4138: *Road Vehicles - Steady State Circular Test Procedure* 1982.
- [5] Norma ISO 7401, *Road vehicles - Lateral transient response test methods*, (DIS: 1986, TR: 1988).
- [6] Simiński, P., *Badania zwrotności pojazdów w trakcie ruchu po sztywnym podłożu*, Rozprawa doktorska. Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej, 2005.