

# ANTYCYPACYJNY MODEL KIEROWCY ZASTOSOWANY W PROGRAMIE DO SYMULACJI RUCHU I ZDERZEŃ POJAZDÓW V-SIM

Dariusz BULKA<sup>1</sup>, Stanisław WALCZAK<sup>2</sup>, Stanisław Wolak<sup>1</sup>

## STRESZCZENIE

*W pracy przedstawiono krótką charakterystykę programu V-Sim uzupełnionego o predykcyjny model kierowcy. Skoncentrowano się na opisie zagadnień związanych z analizą ruchu pojazdu po założonym przez użytkownika torze. Omówiono strategię działania zastosowanego modelu kierowcy. Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań symulacyjnych przeprowadzonych za pomocą programu do symulacji dynamiki samochodu CarDyn wykorzystującego model pojazdu o 19 stopniach swobody.*

**Słowa kluczowe:** model kierowcy, symulacja ruchu pojazdu, podwójna zmiana pasa ruchu,

## WPROWADZENIE

W pracy z programami przeznaczonymi do symulacji ruchu i zderzeń pojazdów dość często zachodzi konieczność przeanalizowania złożonego, przedzderzeniowego ruchu pojazdu. W chwili obecnej program V-Sim umożliwia taką analizę wykorzystując uproszczony model kierowania pojazdem pracujący w pętli otwartej. Każdy z wprowadzanych przez użytkownika dyskretnych parametrów odpowiadających za wynikowy ruch pojazdu, opisany jest przez minimum trzy wielkości tj. czas rozpoczęcia zmiany danego parametru (lub droga), wartość, o jaką dany parametr ma być zmieniony oraz czas, w którym ta zmiana ma nastąpić. Niemal każda próba odtworzenia ruchu pojazdu opisanego przez uczestników zdarzenia związana jest z koniecznością wprowadzenia szeregu zadań (pojedynczych manewrów), w których opisane wyżej wielkości muszą być

---

<sup>1</sup> mgr inż. Dariusz Bułka, mgr inż. Stanisław Wolak CyborgIdea s.c., 31-234 Kraków ul. Kuźnicy Kołtatajowskiej 15c

<sup>2</sup> dr inż. Stanisław Walczak, Politechnika Krakowska, 31-864 Kraków al. Jana Pawła II 37

zdefiniowane. Kolejny etap polega na wielokrotnej symulacji w celu ustalenia takiego zbioru parametrów, dla których odtwarzany przebieg ruchu (np. żądany tor jazdy) odpowiadał będzie w sposób możliwie dokładny opisanemu i/lub utrwalonemu na miejscu zdarzenia w postaci materialnych śladów wypadku.

Opisany powyżej tok postępowania posiada dwie zasadnicze wady:

- wymaga od użytkownika programu dużego nakładu pracy z uwagi na dobór wartości parametrów metodą „prób i błędów”,
- wymaga rozległej wiedzy oraz dużego doświadczenia pozwalającego uwzględnić w procesie symulacji zarówno ograniczenia psychomotoryczne kierowcy jak i ograniczenia wynikające z zastosowanego modelu pojazdu.

W celu ułatwienia obsługi i ograniczenia możliwości popełnienia ewentualnych błędów przez niedoświadczonego użytkownika, wprowadzono do istniejącego programu V-Sim, antycypacyjny model kierowania pojazdem, pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. Przy tworzeniu tego modelu oparto się na szeregu publikacji dotyczących tego typu modeli kierowcy, które ukazywały się zarówno w Polsce jak i poza granicami naszego kraju [1], [6], [7], [9], [11].

## **1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANYCH MODELI MATEMATYCZNYCH**

Spośród istniejących modeli kierowcy do zastosowań w programie V-Sim wybrano zmodyfikowany model antycypacyjny, który opisany jest czterema parametrami reprezentującymi: czas reakcji, długość odcinka antycypacji, współczynnik wzmocnienia oraz współczynnik tłumienia.

Jak pokazują liczne symulacje [9], [13] współczynniki opisujące model kierowcy zależą nie tylko od rodzaju samochodu, ale również od rodzaju manewrów i parametrów ruchu pojazdu.

Z powyższych względów konieczność doboru zależności współczynników opisujących model kierowcy od parametrów ruchu pojazdu spoczywa na twórcach programu. Użytkownikowi pozostawiono jedynie możliwość zmiany wartości początkowych tych parametrów tak, aby zadany tor ruchu zrealizowany był możliwie dokładnie.

Ponieważ w rzeczywistych warunkach działanie kierowcy uwarunkowane jest oddziaływaniem układu człowiek-pojazd-otoczenie, dlatego weryfikację zaimplementowanego modelu kierowcy przeprowadzono poprzez porównanie z programem CarDyn [13], w którym zastosowano model kierowcy o identycznej strukturze, a jego działanie zostało zweryfikowane na drodze eksperymentalnej.

Z poznawczego punktu widzenia ciekawym było porównanie wpływu złożoności matematycznego modelu pojazdu na przebiegi kąta obrotu kierownicy realizowane przez model kierowcy.

Charakterystykę modeli pojazdu i kierowcy zastosowanych w obu wspomnianych programach symulacyjnych przedstawiono poniżej.

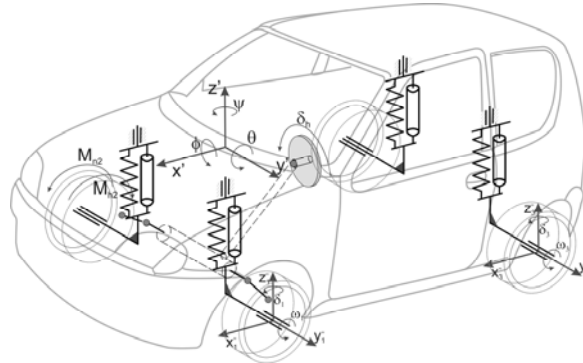
## 1.1. Model pojazdu

### 1.1.1. Program V-Sim

Pojazd w programie V-Sim zamodelowano jako układ 5 ciał sztywnych o 10 stopniach swobody (nadwozie – 6 stopni swobody, każde z kół – 1 stopień swobody) (rys. 1).

Model pojazdu uwzględnia następujące elementy:

- **Rozkład masy.** Program umożliwia swobodne zdefiniowanie rozkładu masy pojazdu poprzez wskazanie dowolnego położenia środka masy i głównych momentów bezwładności pustego pojazdu. Przy wyznaczeniu wypadkowego położenia środka masy oraz momentów bezwładności program uwzględnia rozmieszczenie ładunku i pasażerów wewnątrz pojazdu.
- **Zawieszenie.** Zastosowano prosty, kinematyczny model niezależnego zawieszenia kół, uwzględniający przemieszczenie pionowe i skręt koła. Siły reakcji wyznaczone są przy uwzględnieniu nieliniowych charakterystyk sprężysto-tłumiących zawieszenia. Zastosowany model umożliwia również analizowanie wpływu na ruch różnego stopnia zużycia lub awarii poszczególnych elementów zawieszenia.
- **Koła.** Dla każdego koła niezależnie analizowana jest dynamika jego ruchu obrotowego (uwzględniając po jednym stopniu swobody). Przy wyznaczaniu interakcji opona – nawierzchnia wykorzystano model opracowany w Instytucie Bezpieczeństwa Drogowego Uniwersytetu Michigan (HSRI) przez zespół Dugoffa z uwzględnieniem wprowadzonych później udoskonaleń [12].
- **Układ kierowniczy.** Realizowany jest przez prosty, kinematyczny model. W modelu tym uwzględniona jest podatność rzeczywistego układu poprzez korektę poprzecznych sił reakcji opon osi kierowanej. Układ ten realizuje lub, opcjonalnie nie, zasady Ackermana. Kierowane mogą być dowolnie wybrane osie pojazdu.
- **Układ hamulcowy.** Zastosowany model układu hamulcowego uwzględnia działanie korektora siły hamowania tylnej osi spełniającego wymagania załącznika nr X 13-go regulaminu ECE dla każdego stanu obciążenia z możliwością pracy regulatora liniowego. Parametry układu hamulcowego i rozdzielacza sił zadawane są parametrycznie. Układ hamulcowy może opcjonalnie uwzględniać działanie układu przeciwblokującego (ABS) działającego poprzez modulację momentu hamującego kół w oparciu o ich względny poślizg. Zastosowany model umożliwia również analizowanie wpływu nieprawidłowego funkcjonowania elementów tego układu.
- **Silnik.** Pojazdy mogą być wyposażone w modele silników o zadanej parametrycznie charakterystyce, umożliwiające uzyskanie przez pojazd rzeczywistych wartości przyspieszeń.
- **Układ przeniesienia napędu.** Pojazdy posiadają modele układów przeniesienia napędu zawierające takie elementy jak: sprzęgło, skrzynia biegów z możliwością ręcznej lub automatycznej zmiany przełożenia, przekładnię główną, oraz mechanizm różnicowy. Napęd może być przekazywany na dowolnie wybrane osie pojazdu.



Rys. 1. Model samochodu zastosowany w programie V-Sim

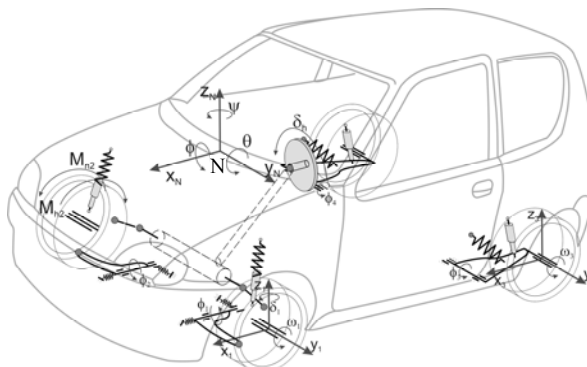
## 1.2. Program CarDyn

Pojazd w programie CarDyn zamodelowano jako układ 9 ciał sztywnych o 19 stopniach swobody: (nadwozie 6, zawieszenie przednie 5, zawieszenie tylne 2, każde z kół 1 stopień swobody). Ruch kulisty bryły nadwozia względem bieguna N (rys. 2) opisano wykorzystując kąty quasi-eulerowskie. Do opisu ruchu strukturalnych modeli mechanizmów zawiesznień względem nadwozia wybrano współrzędne konfiguracyjne: dla mechanizmu zawieszienia przedniego są to: kąty obrotu wahaczy wokół osi obrotu, kąty obrotu wahaczy wynikające z ich podatnego mocowania do nadwozia, przesunięcie listwy zębatej, dla mechanizmu zawieszienia tylnego są to kąty obrotu wahaczy wokół osi obrotu.

Układ kierowniczy zamodelowano mechanizmem przestrzennym. W przypadku manewrów z przytrzymaną kierownicą mechanizm ten posiada jeden stopień swobody (przesunięcie listwy zębatej), a jego podatność zredukowano do wałka kierowniczego.

Przyjęto nieliniowe charakterystyki sprężysto-tłumiące zawiesznień, wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych.

Zastosowano model opony *TM-Easy* [4], [10], zmodyfikowany w pracy [13], Model uwzględnia własności sprężysto-tłumiące opony w kierunku pionowym, wzdłużnym i poprzecznym. Stany nieustalone każdej z opon opisano dwoma równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu.



Rys. 2. Model samochodu zastosowany w programie CarDyn

### 1.3. Model kierowcy

Na rys. 3 pokazano schemat wyjaśniający zasadę działania zmodyfikowanego modelu PPDM [13]. Kierowca obserwuje punkt  $W$  położony na płaszczyźnie jezdni w płaszczyźnie podłużnej symetrii pojazdu w odległości  $L_a$  od środka masy. Ocenia odległość  $\varepsilon$  między torem pożądanym (punkt  $W_d$ ) a położeniem punktu  $W$  oraz w zależności od potrzeb koryguje tor ruchu obracając kierownicą proporcjonalnie do odległości  $\varepsilon$  oraz prędkości jej zmian  $\dot{\varepsilon}$  z pewnym opóźnieniem czasowym  $T_k$ . Kąt obrotu kierownicy oraz prędkość jego zmian wynosi:

$$\begin{aligned} \delta_H(t) &= k_1 \cdot \varepsilon(t - T_k) + k_2 \dot{\varepsilon}(t - T_k) \\ \dot{\delta}_H(t) &= k_1 \cdot \dot{\varepsilon}(t - T_k) + k_2 \ddot{\varepsilon}(t - T_k) \end{aligned} \quad (1)$$

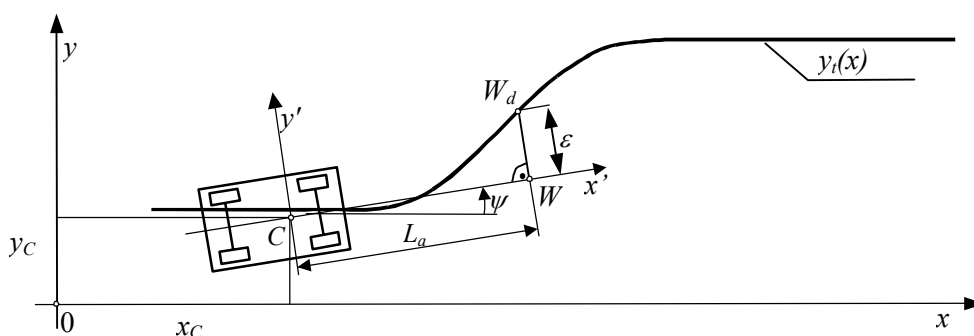
gdzie:  $k_1$  – współczynnik wzmocnienia, zależny od przełożenia w układzie kierowniczym i prędkości jazdy,  $k_2$  – współczynnik tłumienia, zależny od prędkości jazdy.

Położenie punktu  $W$  na płaszczyźnie jezdni w zależności od odległości  $L_a$  wynosi:

$$\begin{cases} x_W = x_C + L_a \cos \psi \\ y_W = y_C + L_a \sin \psi \end{cases} \quad (2)$$

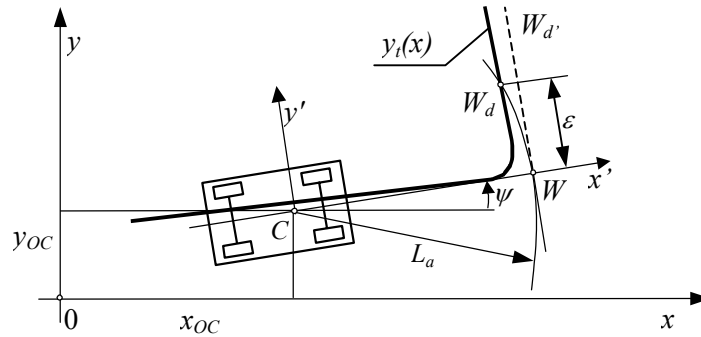
Odległość  $\varepsilon$  punktów  $W_d$  i  $W$  wynosi:

$$\varepsilon = y'_{W_d} = (y_{W_d} - y_W) \cos \psi - (x_{W_d} - x_W) \sin \psi \quad (3)$$



Rys. 3. Schemat wyjaśniający zasadę działania zmodyfikowanego modelu PPDM

Przedstawiony powyżej sposób wyznaczania punktu  $W_d$ , na podstawie którego określany jest błąd  $\varepsilon$  posiada osobliwość, nie pozwalającą zastosować go wprost w programie V-Sim. W przypadku, kiedy użytkownik zadałby tor który tworzyłby z osią podłużną pojazdu kąt równy bądź większy od kąta prostego wówczas nie można by wyznaczyć błędu powyższą metodą, ponieważ punkt  $W_d$  leżałby w nieskończoności (patrz rys. 4). Z tego powodu zmodyfikowano sposób wyznaczania błędu w celu usunięcia powyższej osobliwości. Punkt  $W_d$ , zdefiniowano jako punkt leżący nie na przecięciu prostej, przechodzącej przez punkt  $W$ , prostopadłej do osi podłużnej i zadanego toru jazdy, lecz na przecięciu okręgu zakreślonego ze środka masy, o promieniu równym długości odcinak antycypacji  $L_a$ , oraz zadanego toru jazdy. Zmodyfikowany sposób wyznaczania punktu  $W_d$  przedstawiono na rys. 4.

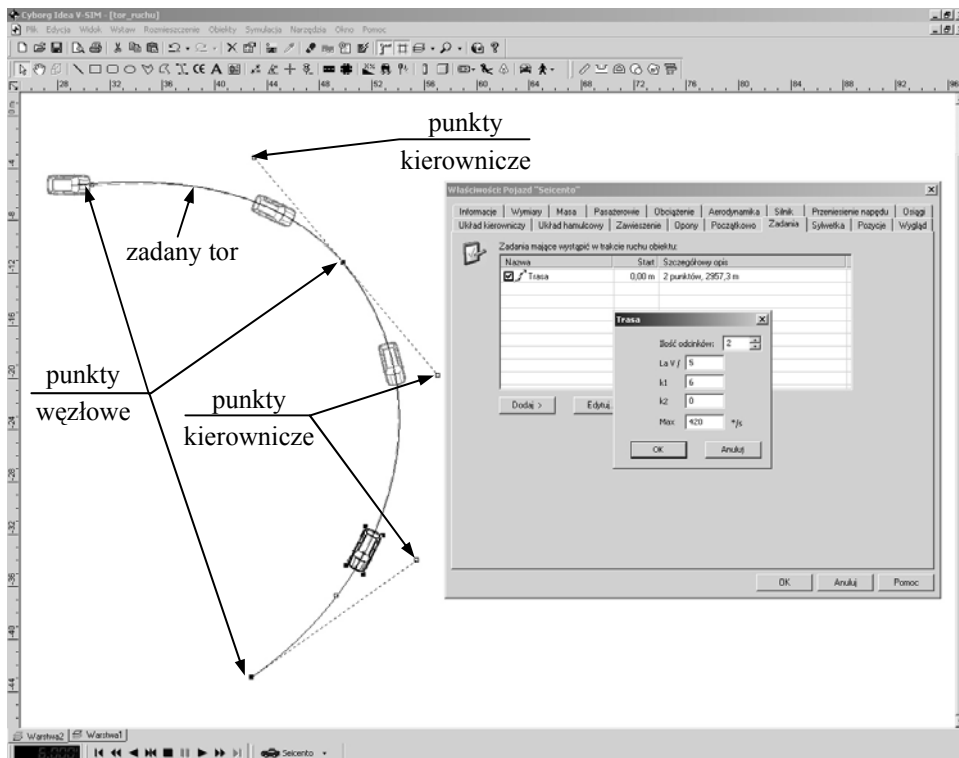


Rys. 4. Zmodyfikowany sposób wyznaczania błęd  $\varepsilon$

#### 1.4. Definiowanie toru ruchu

Definiowanie toru ruchu polega na wprowadzeniu przez użytkownika w oknie dialogowym (rys. 5) liczby elementarnych odcinków, z których będzie składał się zadany tor.

Po zadeklarowaniu liczby odcinków na płaszczyźnie rysunku należy rozmieścić, za pomocą urządzenia wskazującego (np. myszy), punkty węzłowe oraz punkty kierownicze, tak aby możliwie dokładnie odwzorować wymagany tor ruchu.



Rys. 5. Zadawanie toru jazdy w programie V-Sim

Każdy z elementarnych odcinków zadanego toru opisany jest w programie V-Sim parametryczną krzywą Bezier'a, trzeciego stopnia postaci:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} (u \in (0,1)) = \begin{pmatrix} u^3 x_1 + 3u^2(1-u)x_0 + 3u(1-u)^2 x_0' + (1-u)^3 x_0 \\ u^3 y_1 + 3u^2(1-u)y_0 + 3u(1-u)^2 y_0' + (1-u)^3 y_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

$(x_0, y_0)$  – współrzędne punktu początkowego,

$(x_1, y_1)$  – współrzędne punktu końcowego,

$(x_0', y_0')$  – współrzędne początkowego punktu kierowniczego,

$(x_1', y_1')$  – współrzędne końcowego punktu kierowniczego.

## 2. BADANIA SYMULACYJNE

Antycypacyjny model kierowcy zastosowany w programie V-Sim poddano weryfikacji porównując przebiegi kąta obrotu kierownicy oraz parametry ruchu samochodu z przebiegami otrzymanymi za pomocą zweryfikowanego eksperymentalnie programu CarDyn [13]. Do weryfikacji wybrano próbę podwójnej zmiany pasa ruchu wg [5].

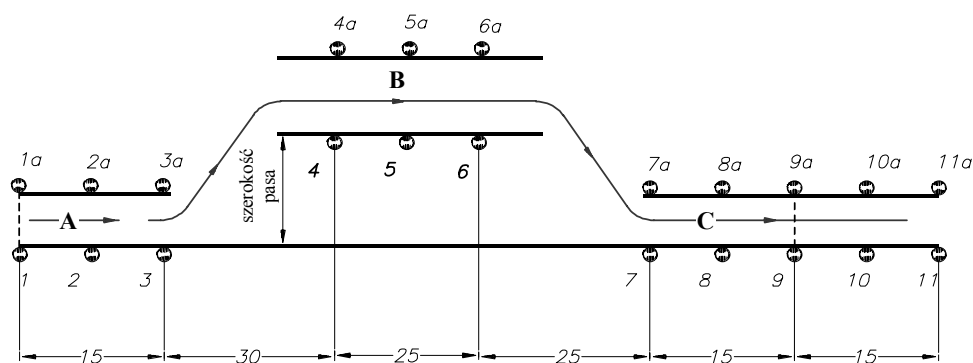
Zgodnie z normą, próba ta polega na przejeździe przez odcinek badawczy o odpowiednich wymiarach. Schemat toru badawczego, z wymaganymi wymiarami, pokazano na rys. 6.

Badania symulacyjne przeprowadzono dla samochodu Seicento o masie 920 kg (2 osoby i aparatura badawcza). Próby wykonano dla dwóch prędkości jazdy: 15 i 20 [m/s].

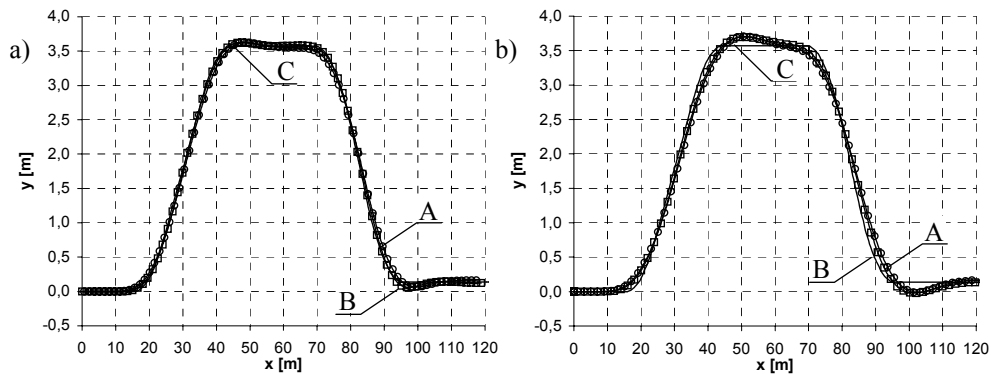
Porównywano następujące parametry:

- tor ruchu środka masy,
- kąt obrotu kierownicy  $\delta_H$ ,
- prędkość kątowna odchylenia  $\dot{\psi}$ ,
- przyspieszenie poprzeczne  $a_y$ ,
- kąt przechyłu poprzecznego  $\varphi$ .

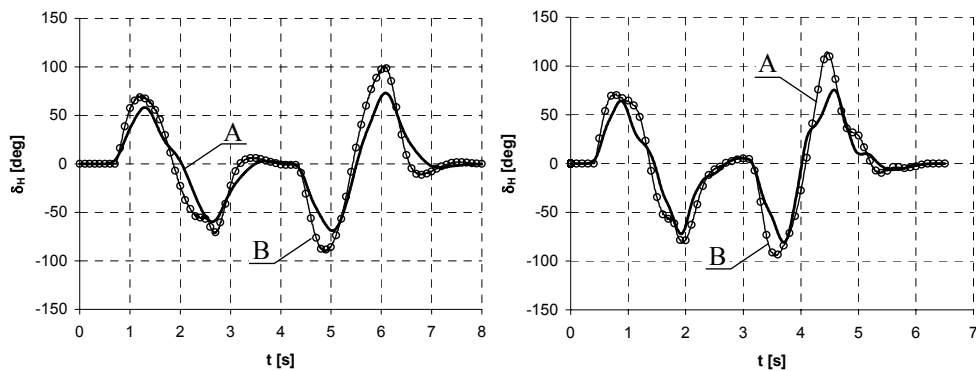
Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 7-11.



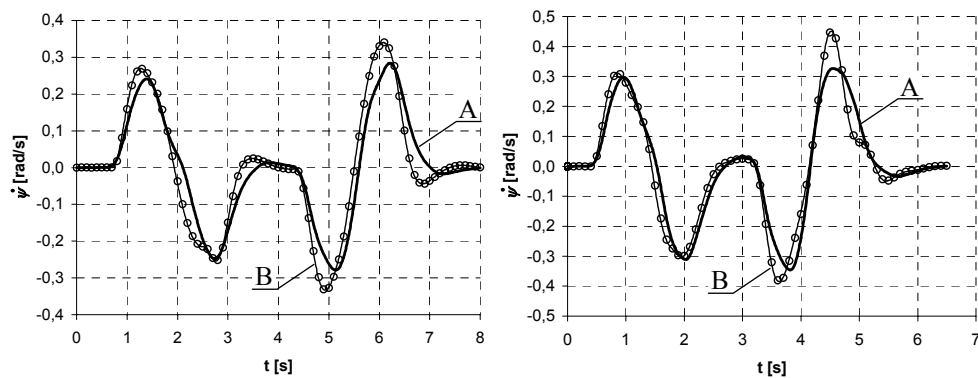
Rys. 6 Schemat toru badawczego dla próby podwójnej zmiany pasa ruchu. Szerokość korytarzy na poszczególnych odcinkach jest dostosowana do szerokości badanego samochodu



Rys. 7. Tor ruchu środka masy: a) dla prędkości 15 m/s, b) dla prędkości 20 m/s, A – program CarDyn, B – program V-Sim, C – zadany tor jazdy

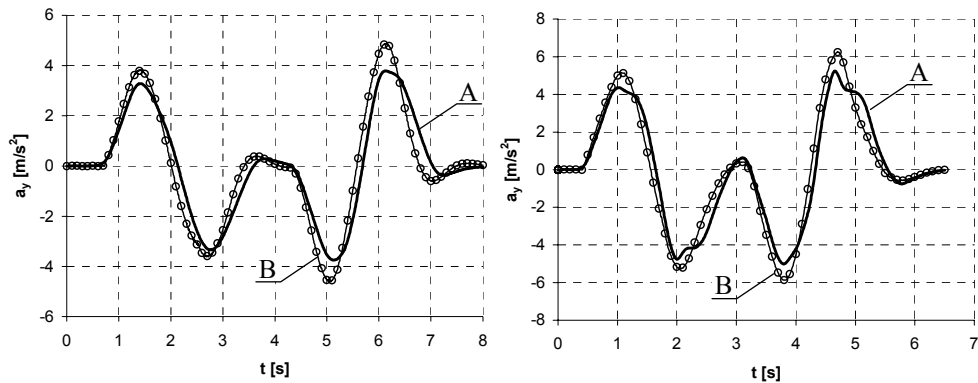


Rys. 8. Kąt obrotu kierownicy: a) dla prędkości 15 m/s, b) dla prędkości 20 m/s, A – program CarDyn, B – program V-Sim

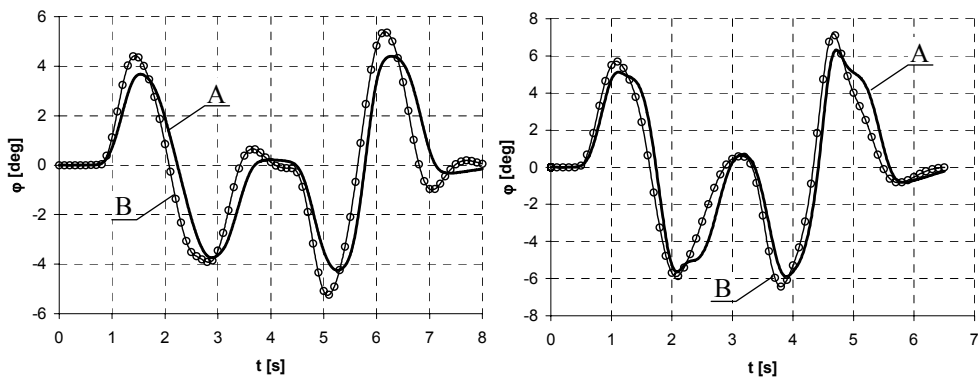


Rys. 9. Prędkość kątowa odchylenia: a) dla prędkości 15 m/s, b) dla prędkości 20 m/s, A – program CarDyn, B – program V-Sim





Rys. 10. Przyspieszenie poprzeczne: a) dla prędkości 15 m/s, b) dla prędkości 20 m/s, A – program CarDyn, B – program V-Sim



Rys. 11. Przechył poprzeczny nadwozia: a) dla prędkości 15 m/s, b) dla prędkości 20 m/s, A – program CarDyn, B – program V-Sim

### 3. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

Zastosowany w pracy antycypacyjny model kierowcy w znacznym stopniu poprawia funkcjonalność programu V-Sim poprzez wyeliminowanie żmudnego zadawania parametrów kierowania pojazdem w celu realizacji wymaganego toru jazdy. Zadaniem użytkownika pozostało w takim przypadku jedynie narysowanie za pomocą myszy toru jazdy, a model kierowcy wyznacza w pętli sprzężenia zwrotnego kąt obrotu kierownicy, w celu możliwie dokładnego odwzorowania tego toru.

Jak wynika z przebiegów przedstawionych na rys. 8-11 zastosowany model kierowcy z wystarczającą, do celów analizy sytuacji przedzderzeniowych, dokładnością realizuje zadany tor jazdy dla różnych prędkości początkowych. Parametry ruchu samochodu są zbliżone do wyników uzyskanych ze zweryfikowanego eksperymentalnie programu CarDyn, wykorzystującego model samochodu o 19 stopniach swobody.

Nieznaczne różnice wynikają zarówno z różnic w złożoności zastosowanych w programach modeli samochodu, jak również z nieco odmiennego sposobu wyznaczania błędu pomiędzy torem zadanym a realizowanym.

Modyfikacja sposobu wyznaczania powyższego błędu pozwoliła na uzyskanie stabilnej pracy programu V-Sim, niezależnie od rodzaju toru zadanego przez użytkownika.

## LITERATURA

1. Day T., D., Metz D., L., *The Simulation of Driver inputs using a vehicle driver model*. SAE paper 2000-01-1313, 2000.
2. Day T., D., York Al. R., *A new vehicle simulation model for vehicle design and safety research*. SAE paper 2001-01-0503, 2001.
3. Dugoff H., Fancher P.S., Segel L., *An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamics Performance*. SAE Technical Paper 700377.
4. Hirschberg W., Rill G., Weinfurter H., *User-Appropriate Tyre-Modeling for Vehicle Dynamics in Standard and Limit Situation*. Vehicle System Dynamics, vol. 38 (2002), pp. 103-125.
5. ISO/TR –3888 Road Vehicles – Test Procedure for a Severe Lane-Change Manoeuvre.
6. Jurecki R., S., *Budowa i weryfikacja eksperymentalna modelu kierowcy dla analizy sytuacji przedwypadkowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika 79, str. 237-248, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004.
7. Lozia Z., *Analiza ruchu samochodu dwuosiowego na tle modelowania jego dynamiki*. Prace Naukowe-Transport, z. 41, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.
8. Mitschke M., *Dynamika samochodu*. WKŁ Warszawa 1977.
9. Reński A., *Identification of Driver Model Parameters*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2001, VOL. 7, NO. 1, pp. 79-92.
10. Rill G., *Simulation von Kraftfahrzeugen*. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden 1994.
11. Stańczyk T., L., Jurecki R., S., *Modele kierowcy (możliwość wykorzystania do analizy sytuacji przedwypadkowych)*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika 79, str. 105-138, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004.
12. Uffelmann F., *Rechenmodell eines Reifens für Seiten und Umfangskraftübertragung*. Institut für Fahrzeugtechnik Braunschweig 1978.
13. Walczak St.: *Analiza dynamicznych obciążeń elementów niezależnych zawiesznień kół samochodu*. Politechnika Krakowska. Rozprawa doktorska, Kraków 2003.

## PREVIEW PREDICTOR DRIVER MODEL USED IN COMPUTER PROGRAM FOR THE SIMULATION OF CAR ACCIDENTS

### SUMMARY

*The paper presents the short description of computer program V-Sim for the simulation of car dynamic and accidents with preview predictor driver model. The most important things of the paper was the analysis of vehicle motion during following the desired path. The basis of driver model and path generation was described. The results of simulation were compared with results getting from computer program CarDyn with 19 DOF.*

**Key words:** preview predictor driver model, simulation of vehicle dynamic, double lane change manoeuvre