

Łukasz DRAĞ<sup>1</sup>

## OCENA ODWZOROWANIA RUCHU PODĄŻAJĄCEGO POJAZDU W MIKROSKOPOWYCH MODELACH RUCHU BEZPIECZNEJ ODLEGŁOŚCI W WARUNKACH RUCHU DROGOWEGO

*Jednym z istotnych czynników nieustannie kontrolowanych przez kierowcę pojazdu podczas jazdy jest zachowanie pojazdu poprzedzającego. Osoba kierująca pojazdem, obserwując pojazd jadący bezpośrednio przed nim, stara się dostosować prędkość ruchu do prędkości ruchu poprzednika oraz zachować do niego bezpieczną odległość. Odległość ta, zapewnia kierującemu zatrzymanie pojazdu bez powodowania kolizji. W pracy porównywano wyniki pomiarów eksperymentalnych z wynikami modelowania ruchu pojazdu poruszającego się za innym pojazdem w ruchu drogowym. Do porównania wybrano kilka powszechnie stosowanych modeli typu bezpiecznej odległości.*

## EVALUATION OF CAR FOLLOWING PROCESS IN MICROSCOPIC SAFE DISTANCE MODELS FOR ROAD TRAFFIC CONDITIONS

*One of the important factors constantly controlled by the driver is behavior of previous vehicle. The driver observing the leader move tries to adjust speed to him and keep to him safe distance. This distance, allow the driver to stop vehicle without coursing a collision. The results of experimental measurements and results of modeling of car following process in the paper have been compared. The comparison concern a few selected microscopic safe distance models.*

### 1. WSTĘP

Spośród wszystkich modeli ruchu potoku pojazdów, mikroskopowe modele ruchu stanowią grupę najliczniejszą. Klasyfikację mikroskopowych modeli ruchu zazwyczaj przeprowadza się ze względu na sposób realizacji procesu podążania, czyli zachowania pojazdu podczas jazdy za innym pojazdem, liderem. W grupie modeli jazdy za liderem można wyróżnić modele: bodziec-reakcja, bezpiecznej odległości i psychofizyczne [1,2].

Modele bodziec reakcja wykorzystują koncepcję opisu pojazdu w potoku na zasadzie reakcji na bodziec. Bodźcem do zmiany strategii poruszania pojedynczego pojazdu jest wystąpienie różnicy w prędkości w stosunku do pojazdu poprzedzającego. Wystąpienie

---

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Informatyki; Katedra Transportu i Informatyki, 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2; tel: +48 338-279-269, fax: +48 338-279-289, e-mail: ldrag@ath.eu

bodźca jest uzależnione od przyjętego poziomu wrażliwości. Do parametryzacji wrażliwości wykorzystuje się informację o prędkości pojazdu podążającego oraz odległość pomiędzy pojazdami. Inne podejście do opisu zachowania pojazdu w potoku w czasie podążania wykorzystują modele bezpiecznej odległości. Podstawowym założeniem w modelach tej grupy jest utrzymywanie przez pojazd podążający bezpiecznej odległości od pojazdu poprzedzającego w potoku. Z kolei, w modelach psychofizycznych w opisie zachowania kierowcy pojazdu podążającego stosuje się podejście, w którym istotnym elementem są progi reakcji. Reakcja kierowcy, skutkująca zmianą prędkości pojazdu następuje po osiągnięciu wyznaczonych progów. Progi reakcji, definiowane w zależności od zmiany prędkości i odległości pomiędzy pojazdami, oznaczają wystąpienie jednej z następujących sytuacji: zbliżania się pojazdów, podążania, zbyt małej odległości pomiędzy pojazdami [3].

Ze względu na dużą liczbę nowo tworzonych i rozwijanych modeli mikroskopowych, w literaturze można znaleźć wiele prac dotyczących porównania sposobu odwzorowania ruchu podążającego pojazdu. Porównanie wyników modelowania ruchu pojazdu w sytuacji jazdy za liderem, realizującym określony test drogowy według modeli bodziec-reakcja, bezpiecznej odległości i psychofizycznych można znaleźć między innymi w pracach [4, 5, 6]. W pracach tych analizowano przyśpieszenie i prędkość pojazdu podążającego, różnice w prędkości i odległości pomiędzy pojazdami wskazując różnice otrzymywane w wyniku zastosowania poszczególnych typów modeli ruchu.

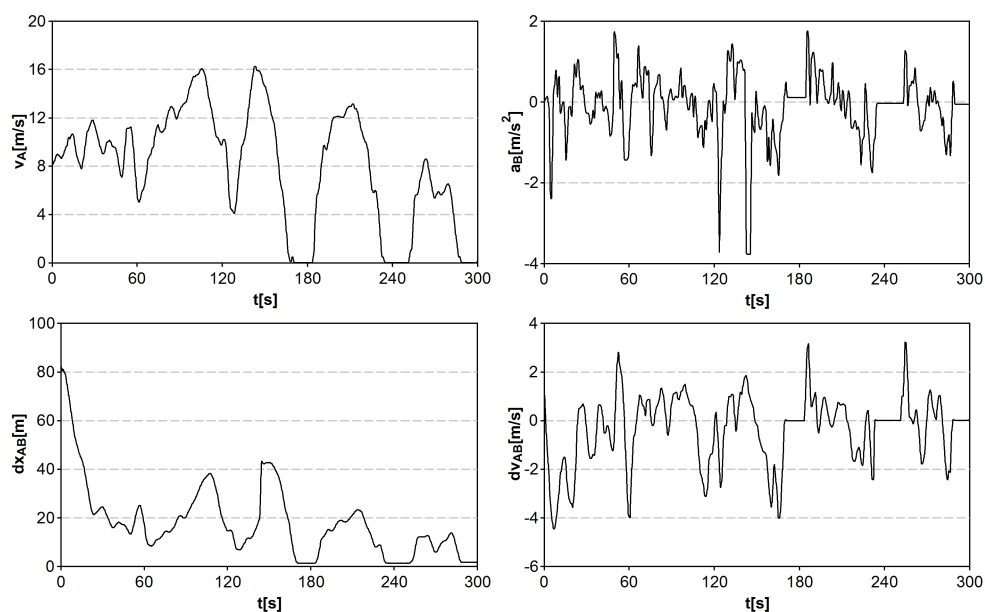
Ważnym problemem, związanym z zastosowaniem modeli mikroskopowych ruchu jest właściwa parametryzacja współczynników empirycznych, czyli tzw. proces kalibracji modelu. Problemowi poprawnej kalibracji modeli ruchu, poświęcono między innymi prace [7, 8, 9, 10, 11]. Wymienione prace zawierają analizy porównawcze wyników eksperymentalnych i wyników obliczeń w zadaniu odwzorowania ruchu potoku pojazdów.

We wspomnianych pracach analizy porównawcze przeprowadzono dla różnego typu układów komunikacyjnych. W pracy [8] analizowano wyniki modelowania ruchu potoku pojazdów w zadaniu odwzorowania ruchu potoku pojazdów w warunkach jazdy autostradowej. Z kolei w pracach [9, 10] analizowano wyniki odwzorowania ruchu dziewięciu pojazdów poruszających się w kolumnie po owalnym torze. Natomiast w pracy [11] skupiono się na analizie wyników odwzorowania ruchu pojazdu podążającego na pojedynczym pasie jezdni. Z przedstawionych w przywołanych pracach wyników analiz, wynika, że niewłaściwie dobrana próbka danych eksperymentalnych, na podstawie, której zostanie przeprowadzona kalibracja parametrów empirycznych modeli, prowadzi do otrzymywania wyników modelowania ruchu znacząco odbiegających od obserwowanych w rzeczywistości.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki modelowania ruchu podążającego pojazdu w ruchu drogowym. Do opisu ruchu lidera wykorzystano dane z pomiaru eksperymentalnego, obejmującego rejestrację parametrów dynamiki ruchu i odstępów pomiędzy dwoma pojazdami, uzyskane na pojedynczym pasie jezdni w trakcie popołudniowego szczytu komunikacyjnego. Na podstawie danych z pomiaru przeprowadzono kalibrację modeli ruchu, między innymi opracowano funkcje opisujące maksymalne przyspieszenia i opóźnienia podążającego pojazdu.

## 2. BADANIA DROGOWE

W celu przeprowadzenia wiarygodnej oceny modelu ruchu pod względem sposobu odwzorowania procesu podążania pojazdu dokonuje się porównania wyników modelowania z wynikami pomiarów eksperymentalnych. W pracy do porównania wykorzystano dane z pomiaru eksperymentalnego zamieszczone w pracy [11]. Dane zostały zarejestrowane przez grupę badawczą Roberta Bosha na pojedynczej pasie jezdni w Stuttgardzie w Niemczech. Pomiar wykonano w czasie popołudniowego szczytu. Obejmował on rejestrację parametrów dynamiki ruchu i położenia dwóch pojazdów (A i B) z częstotliwością 10 Hz w czasie 300 s (Rys.1). Analiza przebiegów prędkości i przyspieszenia pojazdów pozwala stwierdzić, że ruch pojazdów charakteryzuje się znaczną dynamiką, typową dla ruchu w warunkach jazdy miejskiej.



Rys.1. Prędkość  $v_A$  [m/s] pojazdu A, przyspieszenie  $a_B$  [ $m/s^2$ ] pojazdu B, odległość  $dx_{AB}$  [m] oraz różnica prędkości  $dv_{AB}$  [m/s] pomiędzy pojazdami A i B zarejestrowane podczas pomiaru drogowego [11]

Prezentowane wyniki pomiarów drogowych wielokrotnie wykorzystywało podczas walidacji procesu podążania pojazdu w modelach ruchu wchodzących w skład komercyjnych pakietów komputerowych, takich jak AIMSUN i VISSIM. Świadczą o tym, dokonywane porównywania wyników modelowania z wynikami eksperymentu zamieszczone w pracach [12, 13].

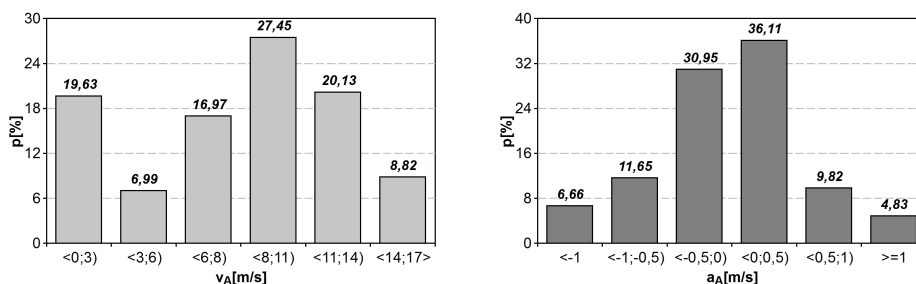
Dane charakteryzujące ruch pojazdów A i B podczas pomiaru drogowego zamieszczono w tab. 1. Można zauważyć, że na początku pomiaru, pojazd A poruszał się z prędkością większą od pojazdu B oraz odległość pomiędzy pojazdami wynosiła 81,1 m. W trakcie eksperymentu najmniejszą odległość pomiędzy pojazdami A i B odnotowano na poziomie

1,5 m, a przyspieszenie i opóźnienie pojazdów mieściło się w granicach  $a \in \langle -3,8; 3 \rangle \text{ m/s}^2$ . Pomiar przerwano po 300 s, gdy oba pojazdy zatrzymały się.

Tab.1. Dane charakteryzujące ruchu pojazdów A i B - pomiar drogowy

Parametr	Opis	Wartość
$v_A$ , $v_B$	początkowa i końcowa prędkość pojazdów A i B [m/s]	8,22; 0 7,13; 0
$dx_{AB}$ , $dx_{AB}^{\max}$ , $dx_{AB}^{\min}$	początkowa, maksymalna i minimalna odległość pomiędzy pojazdami A i B [m]	81,10; 81,10; 1,5
$dv_{AB}$ , $dv_{AB}^{\max}$ , $dv_{AB}^{\min}$	początkowa, maksymalna i minimalna różnica w prędkości pomiędzy pojazdami A i B [m/s]	1,09; 3,21; -4,46
$v_A^{\max}$ , $v_A^{\min}$ , $\bar{v}_A$	maksymalna, minimalna, średnia prędkość pojazdu A [m/s]	16,26; 0; 8,01
$a_A^{p,\max}$ , $a_A^{o,\max}$ $a_B^{p,\max}$ , $a_B^{o,\max}$	maksymalne przyspieszenie, maksymalne opóźnienie pojazdów A i B [ $\text{m/s}^2$ ]	3,00; -2,2 1,90; -3,8
$D_A$	przebyta droga przez pojazd A [m]	2404,4
$T$	czas pomiaru [s]	300

Na rys. 2 przedstawiono wykresy częstości zarejestrowanych dyskretnych przedziałów prędkości  $v_A$  i przyspieszeń  $a_A$  pojazdu A. Jak można zauważyć największą liczbę zmian stanów prędkości  $v_A$  zanotowano w przedziale  $\langle 8; 12 \rangle \text{ m/s}$ . Z kolei, zmiany przyspieszenia  $a_A$  w przedziale  $\langle -0,5; 0,5 \rangle$  zaobserwowano w ponad 67% przypadkach całkowitego czasu pomiaru.



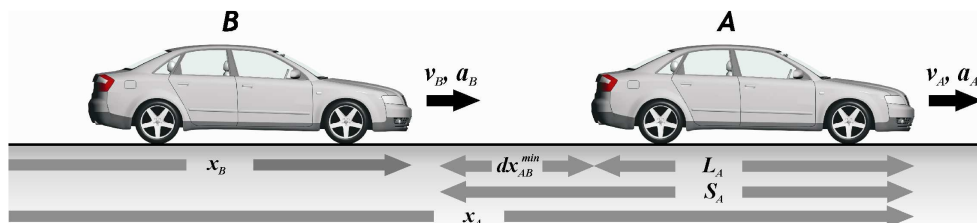
Rys.2. Prędkość  $v_A$  [m/s] i przyspieszenie  $a_A$  [ $\text{m/s}^2$ ] pojazdu A - częstość występowania

### 3. MODELOWANIE RUCHU – MIKROSKOPOWE MODELE BEZPIECZNEJ ODLEGŁOŚCI

W pracy do porównania sposobu odwzorowania poruszania pojazdu w warunkach jazdy za liderem wybrano trzy modele ruchu typu bezpiecznej odległości: model Kraussa, model

Gipssa oraz zmodyfikowany model automatu komórkowego (CA). Z szczegółowej analizy wyników modelowania podążania pojazdu zamieszczonych w jednej z poprzednich prac autora [6], wynika, że grupa modeli bezpiecznej odległości w sposób najbardziej zbliżony do obserwowanego w rzeczywistości oddaje ruch pojazdu poprzedzającego. W cytowanej pracy dokonano porównania modeli ruchu w kontekście sposobu realizacji procesu podążania, uzyskiwanych przyspieszeń i opóźnień przez pojazd podążający oraz wpływu przyjętego sposobu modelowania ruchu na obliczeniową emisję zanieczyszczeń związków szkodliwych spalin. Kolejnym krokiem oceny przydatności wytypowanej grupy modeli ruchu w zagadnieniach modelowania ruchu potoku pojazdów w układach komunikacyjnych powinno być porównanie wyników modelowania z wynikami eksperymentu. Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie porównania modeli ruchu w kontekście dokładności odwzorowania zachowania pojazdu podążającego w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego.

We wszystkich modelach ruchu potoku pojazdów wykorzystujących koncepcję bezpiecznej odległości podstawowym założeniem jest utrzymywanie bezpiecznej odległości przez pojazd podążający do pojazdu bezpośrednio go poprzedzającego w potoku. Dla ujednoczenia stosowanego w pracy opisu zachowania pojazdów według rozważanych modeli ruchu zaproponowano sposób oznaczeń taki jak na rys. 3. Pojazd opisany literą A traktowany jest jako poprzedzający, natomiast literą B oznaczono pojazd podążający.



Rys.3. Podążanie pojazdu, pojazdy poprzedzający A i podążający B podczas ruchu, gdzie:

- $x_A, x_B$  – współrzędne położenia pojazdów A i B ,
- $v_A, v_B$  – prędkości pojazdów A i B ,
- $a_A, a_B$  – przyspieszenia bądź opóźnienia pojazdów A i B ,
- $L_A$  – długość pojazdu A (poprzedzającego),
- $S_A$  – efektywna długość pojazdu A ,
- $dx_{AB}^{\min}$  – minimalny odstęp pomiędzy pojazdami A i B .

W modelu Kraussa bezpieczna prędkość pojazdu podążającego B w chwili  $(i-1)\Delta t$  symulacji wyznaczana jest z zależności [14]:

$$v_B^{bez,(i-1)} = v_A^{(i-1)} + \frac{dx_{AB}^{(i-1)} - d_A^{(i-1)}}{t_{AB}^{o,(i-1)} + T_B}, \quad (1)$$

gdzie:  $v_B^{bez,(i-1)}$  – bezpieczna prędkość pojazdu podążającego  $B$  w kroku  $i-1$  [m/s],  
 $v_A^{(i-1)}$  – prędkość pojazdu poprzedzającego  $A$  w kroku  $i-1$  [m/s],  
 $T_B$  – czas reakcji kierowcy pojazdu  $B$  [s],  
 $dx_{AB}^{(i-1)} = x_A^{(i-1)} - S_A - x_B^{(i-1)}$  – odległość pomiędzy pojazdami  $A$  i  $B$  w kroku  $i-1$  [m],  
 $S_A = L_A + dx_{AB}^{\min}$  – efektywna długość pojazdu  $A$  [m],  
 $L_A$  – długość pojazdu poprzedzającego  $A$  [m],  
 $dx_{AB}^{\min}$  – minimalna odległość pomiędzy pojazdami  $A$  i  $B$  [m],  
 $d_A^{(i-1)} = v_A^{(i-1)}T_B$  – szacowany dystans pokonywany przez pojazd  $A$  w ciągu  $T_B$   
dla kroku  $i-1$  [m],  
 $t_{AB}^{o,(i-1)} = \bar{v}_{AB}^{(i-1)} / a_B^{o,\max}(\bar{v}_{AB}^{(i-1)})$  – czas opóźnienia od prędkości  $\bar{v}_{AB}^{(i-1)}$  do 0  
z uwzględnieniem funkcji opóźnienia  $a_B^{o,\max}(\bar{v}_{AB}^{(i-1)})$  w kroku  $i-1$  [s],  
 $\bar{v}_{AB}^{(i-1)} = (v_A^{(i-1)} + v_B^{(i-1)})/2$  – średnia wartość prędkości pojazdów  $A$  i  $B$  w kroku  
 $i-1$  [m/s].

W celu uwzględnienia fizycznych ograniczeń ruchu pojazdu podążającego w modelu wprowadzono warunek określający prędkość zadaną. Warunek ten zdefiniowano jako minimum z wartości:

$$v_B^{zad,(i-1)} = \min\{v_B^{bez,(i-1)}, v_B^{(i-1)} + a_B^{p,\max}(v_B^{(i-1)})\Delta t, v_B^{\max}\}, \quad (2)$$

gdzie:  $v_B^{bez,(i-1)}$  – bezpieczna prędkość pojazdu  $B$  obliczona z (1),  
 $v_B^{(i-1)}$  – prędkość pojazdu poprzedzającego  $B$  w kroku  $i-1$  [m/s],  
 $a_B^{p,\max}(v_B^{(i-1)})$  – funkcja maksymalnego przyspieszenia pojazdu  $B$  zależna od  $v_B^{(i-1)}$   
w kroku  $i-1$  [m/s<sup>2</sup>],  
 $v_B^{\max}$  – maksymalna prędkość pojazdu  $B$ , zależna od typu drogi [m/s].

Prędkość pojazdu podążającego  $B$  w chwili  $i\Delta t$  jest określana jako maksimum z dwóch wartości:

$$v_B^{(i)} = \max\{0, v_B^{(i-1)} - \eta\}, \quad (3)$$

gdzie:  $\eta$  – jest zaburzeniem prędkości zadanej, określonym jako wartość z przedziału

$$\langle v_B^{zad,(i-1)} - \varepsilon \Delta t a_B^{p,\max}, v_B^{zad,(i-1)} \rangle,$$

$\varepsilon$  – funkcja losowa o wartościach z przedziału  $\langle 0;1 \rangle$ .

W drugim z wykorzystanych w pracy modeli, modelu Gipssa, pojazd podążający  $B$  klasyfikowany jest jako:

- swobodny, wówczas dąży on do osiągnięcia prędkości maksymalnej  $v_B^{\max}$ ,
- ograniczony, wtedy próbuje on regulować swoją prędkość, tak aby uzyskać bezpieczną odległość od pojazdu poprzedzającego A.  
Prędkość pojazdu B w chwili  $i\Delta t$  jest określana jako wartość mniejsza z dwóch prędkości maksymalnych [4]:

$$v_B^{(i)} = \min\{v_B^{\max^A, (i)}, v_B^{\max^B, (i)}\}, \quad (4)$$

gdzie:  $v_B^{\max^A, (i)}$  – maksymalna prędkość pojazdu B [m/s],

$v_B^{\max^B, (i)}$  – maksymalna bezpieczna prędkość pojazdu B [m/s].

Prędkości pojazdu B  $v_B^{\max^A, (i)}$  i  $v_B^{\max^B, (i)}$  opisują zależności [4]:

$$v_B^{\max^A, (i)} = v_B^{(i-1)} + 2,5 a_B^{\max} T_B \left(1 - \frac{v_B^{(i-1)}}{v_B^{\max}}\right) \sqrt{0,025 + \frac{v_B^{(i-1)}}{v_B^{\max}}}, \quad (5)$$

$$v_B^{\max^B, (i)} = a_B^{o, \max} T_B + \sqrt{\left(a_B^{o, \max} T_B\right)^2 - a_B^{o, \max} \left[2\left(x_A^{(i-1)} - S_A - x_B^{(i-1)}\right) - v_B^{(i-1)} T_B - \frac{\left(v_A^{(i-1)}\right)^2}{\bar{a}_{AB}^{o, \max}}\right]} \quad (6)$$

gdzie:  $a_B^{p, \max}$  – maksymalne przyśpieszenie pojazdu B [ $m/s^2$ ],

$a_B^{o, \max}$  – maksymalne opóźnienie pojazdu B [ $m/s^2$ ],

$v_B^{(i-1)}$  – prędkość pojazdu B w kroku  $i-1$  [m/s],

$\bar{a}_{AB}^{o, \max} = (a_A^{o, \max} + a_B^{o, \max})/2$  – oszacowana wartość maksymalnego opóźnienia pojazdu A [ $m/s^2$ ].

Trzeci z modeli, zmodyfikowany model automatu komórkowego (CA) przedstawiony w [15], jest modelem najprostszym. Jego modyfikacja w stosunku do modelu pierwotnego polega na zastąpieniu dyskretnego (komórkowego) opisu ruchu pojazdu poprzez opis ciągły. Prędkość pojazdu B w chwili  $i\Delta t$  jest określana jako minimum z następujących wartości:

$$v_B^{(i)} = \min\left\{\left(x_A^{(i-1)} - S_A - x_B^{(i-1)}\right)/T_B, v_B^{(i-1)} + a_B^{p, \max} \Delta t, v_B^{\max}\right\}, \quad (7)$$

gdzie:  $a_B^{p, \max}$  – maksymalne przyśpieszenie pojazdu B [ $m/s^2$ ],

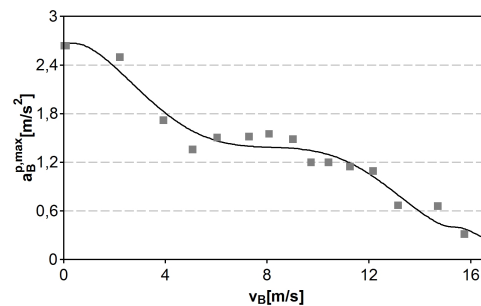
$v_B^{\max}$  – prędkość maksymalna pojazdu B, zależna od typu drogi [m/s],

$T_B$  – czas reakcji kierowcy pojazdu B [s].

#### 4. PARAMETRYZACJA ROZWAŻANYCH MODELI RUCHU

Pewną niedogodnością w stosowaniu modeli mikroskopowych ruchu potoku pojazdów jest konieczność stosowania funkcji opisujących maksymalne przyspieszenie i opóźnienie pojazdów. Zazwyczaj w opisie dynamiki pojazdów wykorzystuje się funkcje aproksymacyjne w postaci wielomianów potęgowych na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych. Oprócz danych eksperymentalnych wykorzystywanych podczas tworzenia funkcji maksymalnego przyspieszenia lub opóźnienia pojazdu wykorzystuje się także dane z modeli ruchu dynamiki pojazdów. W pracy [3] przedstawiono model dynamiki ruchu pojazdów jedno i wieloczlonowych, który umożliwia identyfikację parametrów dynamiki pojazdu (maksymalnych przyspieszeń, przebiegu maksymalnego przyspieszania w trakcie rozpędzania) w zależności rodzaju i stanu nawierzchni jezdni, kąta nachylenia drogi oraz dodatkowego obciążenia pojazdu. Model wykorzystano do parametryzacji współczynników funkcji wielu zmiennych, opisujących przebieg przyspieszenia dla pojazdów należących do trzech różnych kategorii: dwóch samochodów osobowych oraz jednego samochodu ciężarowego. Przykłady wykorzystania innych modeli ruchu pojazdów w zadaniu identyfikacji parametrów dynamiki pojazdów można znaleźć między innymi w pracach [15, 16].

Na potrzeby parametryzacji rozpatrywanych w pracy modeli ruchu funkcje maksymalnego przyspieszenia i opóźnienia pojazdu w zależności od prędkości ruchu dla pojazdu podążającego (B) wyznaczono na podstawie danych eksperymentalnych. W tym celu wszystkie zarejestrowane dane przyspieszenia i opóźnienia oraz odpowiadające im wartości prędkości ruchu ułożono w kolejności rosnącej ze względu na uzyskaną prędkość. Następnie w wybranych przedziałach prędkości ustalono maksymalne przyspieszenia i opóźnienia pojazdu (dyskretne wartości na rys.4).



Rys.4. Funkcja opisująca maksymalne przyspieszenie  $a_B^{p,max}(v_B)$  [m/s<sup>2</sup>] podążającego pojazdu przyjmowana w obliczeniach numerycznych

Wytypowane wartości przyspieszeń posłużyły jako dane wejściowe podczas obliczeń współczynników funkcji aproksymujących. Jako funkcje bazowe funkcji aproksymacyjnych zastosowano wielomian potęgowy piątego stopnia. Współczynniki dopasowania  $R^2$  dla otrzymanych funkcji  $a_B^{p,max}(v_B)$  i  $a_B^{o,max}(v_B)$  wynoszą odpowiednio 0,97 i 0,90.



## 5. WYNIKI MODELOWANIA RUCHU PODĄŻAJĄCEGO POJAZDU

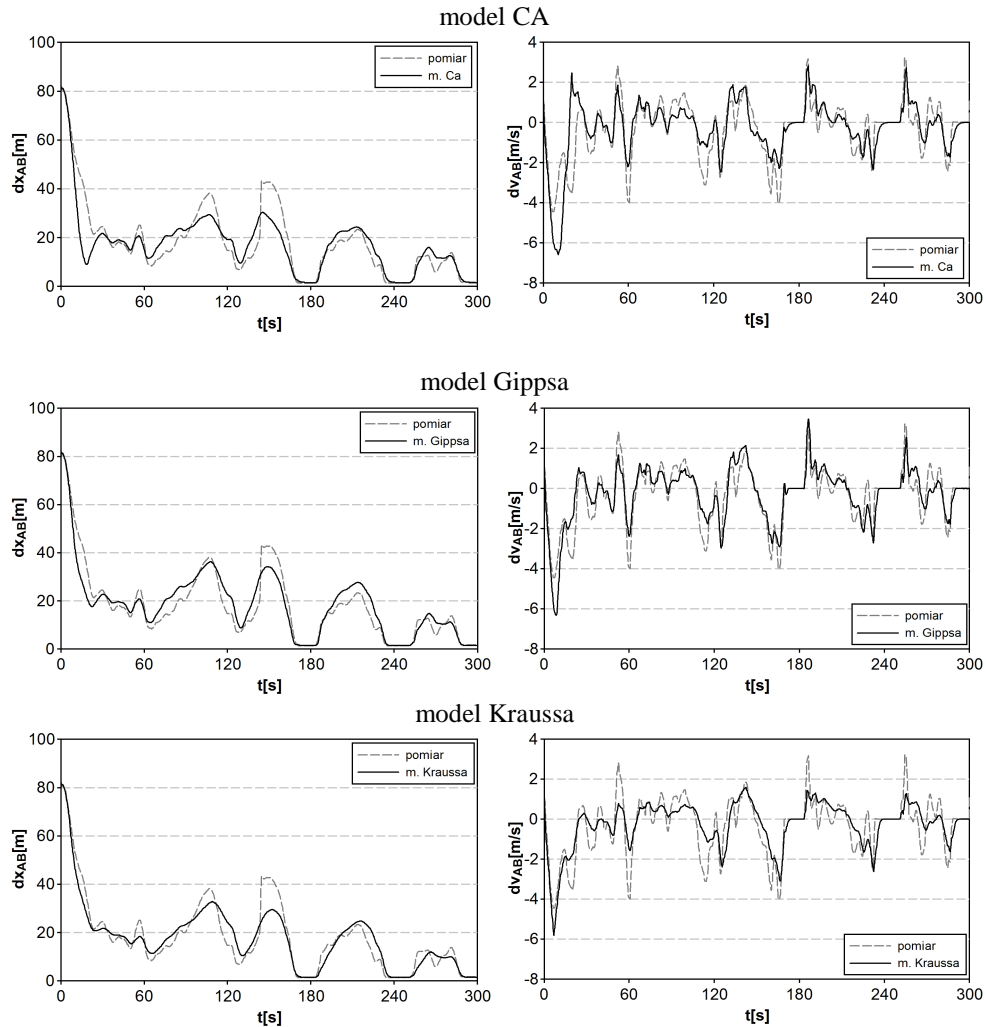
W pracy modelowano ruch pojazdu poruszającego za innym pojazdem, który realizował zadany przebieg prędkości uzyskany z pomiaru eksperymentalnego. Prędkość pojazdu podążającego  $v_B$  na początku symulacji ustalono na 8,22 m/s, a odległość od pojazdu poprzedzającego  $dx_{AB}$  na 81,1 m. W trakcie symulacji rejestrowano położenie, prędkość i przyspieszenie pojazdów: poprzedzającego (A) oraz podążającego (B). Zgromadzone dane wykorzystano do obliczenia zmian odstępów  $dx_{AB}$  oraz różnicy prędkości  $dv_{AB}$  pomiędzy pojazdami. Uzyskane wyniki stanowią podstawę oceny odwzorowania procesu podążania.

Parametry modeli ruchu przyjęte podczas modelowania ruchu podążającego pojazdu przedstawiono w tab. 2. Krok symulacji  $\Delta t$  w modelach Kraussa i Ca przyjmowano jako 0,1 s. W przypadku modelu Gipssa symulacje przeprowadzano dla innego odstępów czasu. Przyjęcie w modelu Gipssa kroku  $\Delta t = 0,7$  s jest wymuszone sposobem opisu ruchu pojazdu. W modelu tym wielkość pojedynczego kroku symulacji ustala się na poziomie czasu reakcji kierowcy, a ten dla wszystkich modeli przyjęto na 0,7 s.

Tab.2. Parametry modeli ruchu przyjmowane w obliczeniach numerycznych

Parametr	Opis	Model		
		CA	Gipssa	Kraussa
$a_B^{p,\max}, a_B^{o,\max}$	maksymalne przyspieszenie i maksymalne opóźnienie pojazdu B [m/s <sup>2</sup> ]	3,0; -4,0 funkcje $a_B^{p,\max}(v_B), a_B^{o,\max}(v_B)$		
$v_B^{\max}$	maksymalna prędkość pojazdu B [m/s]	16,67		
$dx_{AB}^{\min}$	minimalna odstęp pomiędzy pojazdami A i B [m]	1,5		
$\Delta t$	krok symulacji [s]	0,1	0,7	0,1
$T_s$	czas reakcji kierowcy [s]	0,7	0,7	0,7

Na kolejnym rysunku (rys. 5) przedstawiono porównanie wyników pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych odstępów  $dx_{AB}$  i różnicy prędkości  $dv_{AB}$  pomiędzy pojazdami A i B. Analiza przebiegów odległości  $dx_{AB}$  pozwala stwierdzić, że wszystkie porównywane modele ruchu odzwierciedlają odstęp  $dx_{AB}$  w sposób poprawny, zbliżony do obserwowanego w rzeczywistości.



Rys.5. Porównanie wyników pomiaru i obliczeń według modeli a) CA, b) Gippsa c) Kraussa odstępu  $dx_{AB}$  [m/s] i różnicy prędkości  $dv_{AB}$  [m/s] pomiędzy pojazdami A i B

Większe rozbieżności pomiędzy modelami można zaobserwować porównując różnicę prędkości  $dv_{AB}$ . Widać wyraźnie, że prędkość pojazdu podążającego  $v_B$  jest najbardziej zbliżona do prędkości lidera w modelu Kraussa. Ponadto, największe różnice w odległości i prędkości pomiędzy pojazdami A i B dla wszystkich modeli ruchu zanotowano w pierwszych 30 s symulacji. W tym okresie czasu pojazd podążający stara się dogonić pojazd jadący bezpośrednio przed nim, poruszając się z maksymalnym przyspieszeniem.

Do oceny procesu podążania wprowadza się różne miary błędów, jedną z nich jest pierwiastek z średniego błędu kwadratowego (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (dx_{AB}^{(i),s} - dx_{AB}^{(i),p})^2} \quad (8)$$

gdzie:  $dx_{AB}^{(i),p}$  – odstęp pomiędzy pojazdami *A* i *B* z pomiaru eksperymentalnego w *i*-tym kroku czasowym,

$dx_{AB}^{(i),s}$  – odstęp pomiędzy pojazdami *A* i *B* w symulacji w *i*-tym kroku czasowym,

*i* – numer kroku czasowego,

*N* – liczba kroków czasowych.

W tab. 3 i 4 przedstawiono wartości błędu *RMSE* obliczone z wykorzystaniem wyników pomiaru eksperymentu w Stuttgartzie. Tab 3. zawiera wartości błędu *RMSE* obliczone dla autorskich implementacji modeli bezpiecznej odległości z parametryzacją dynamiki ruchu pojazdu podążającego. Z kolei w tab. 4 przedstawiono wartości błędu *RMSE* obliczone w pracy [11] dla symulacji przeprowadzonych z użyciem oprogramowania komercyjnego.

*Tab.3. Wartości błędu RMSE – modele ruchu bezpiecznej odległości*

Model	CA	Gippsa	Kraussa
RMSE	6,63	4,96	4,69

*Tab.4. Wartości błędu RMSE – symulacje z użyciem oprogramowania komercyjnego[11]*

Model	AIMSUN	VISSIM	PARAMICS
RMSE	4,99	5,05	10,43

Z porównania wyników błędu *RMSE* zamieszczonych w tab. 3 i tab. 4 wynika, że otrzymane wyniki modelowania według modeli CA, Gippsa i Kraussa są zbliżone do wyników uzyskanych przy pomocy komercyjnego oprogramowania. Należy jednak podkreślić, że w przypadku stosowania modeli ruchu w pakietach komercyjnych w parametryzacji ruchu podążającego pojazdu wykorzystano domyślne parametry oraz domyślne przebiegi maksymalnego przyspieszenia i opóźnienia.

## 6. PODSUMOWANIE

Tworzone od wielu lat modele ruchu umożliwiają odwzorowanie procesów zachodzących w układach komunikacyjnych. W skład modeli ruchu wchodzi algorytmy opisujące zachowanie pojazdu podczas typowych sytuacji drogowych. W pracy przedstawiono wyniki modelowania ruchu pojazdu poruszającego się za liderem, którego parametry ruchu zarejestrowano podczas pomiarów drogowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników pomiarów z wynikami modelowania odstepu oraz różnicy prędkości pomiędzy pojazdami można stwierdzić, że wszystkie rozpatrywane modele ruchu typu bezpiecznej charakteryzują się dobrą dokładnością odwzorowania ruchu w procesie podążania. Najmniejszą wartość błędu *RMSE* uzyskano dla modelu Kraussa.

Porównanie wartości błędów RMSE dla wyników modelowania w oparciu o autorskie implementacje modeli ruchu z wynikami błędów modelowania otrzymanych z pakietów komercyjnych potwierdza poprawność zastosowanych algorytmów opisujących proces podążania.

## 7. LITERATURA

- [1] TFTM: *Traffic Flow Theory Monographs: Revised Traffic Flow Theory. A state of the Art Report*. Transportation Research Board, National Academy of Science, USA, 2001.
- [2] Hoogendoorn S. P., Bovy P. H. L.: *State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 215, Nr 4, pp. 283–303, 2001.
- [3] Brzozowska L., Brzozowski K., Drağ Ł.: *Transport drogowy a jakość powietrza. Modelowanie komputerowe w mezoskali*. WKŁ, Warszawa, 2009.
- [4] Olstam J., Tapani A.: *Comparison of Car-following models*. Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden, 2004.
- [5] Drağ Ł., Wojciech S.: *Ocena procesu podążania pojazdu w mikroskopowych modelach ruchu*, I International Scientific Conference, Transport Problems, Katowice-Korczyce, 17-19 July 2009, str. 73-80, str. 108-117, 2009.
- [6] Drağ Ł.: *Wpływ modeli ruchu na obliczeniową emisję zanieczyszczeń*. Rozprawa doktorska. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 2008.
- [7] Brackstone M., McDonald M.: *Car-following: a historical review*. Transportation Research Part F 2, pp. 181–196, 1999.
- [8] Brockfeld E., Kühne R., Skabardonis A., Wagner P.: *Towards a benchmarking of Microscopic Traffic Flow Models*. Transportation Research Board, 82<sup>nd</sup> Annual Meeting, 2003.
- [9] Brockfeld E., Kühne R., Wagner P.: *Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models*. Transportation Research Board, 83<sup>rd</sup> Annual Meeting, 2003.
- [10] Brockfeld E., Wagner P.: *Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models*. Traffic and Granular Flow '03, Springer Berlin Heidelberg, pp. 67-72, 2005.
- [11] Panwai S., Dia H.: *Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behavior*. IEEE Transactions on Intelligent transportation Systems, Vol. 6, No. 3, 2005.
- [12] Fellendorf M., Vortisch P.: *Validation of the microscopic traffic flow model VISSIM in different real-world situations*. Transportation Research Board, 80<sup>th</sup> Annual Meeting, 2001.
- [13] Barceló J.: *Microscopic Traffic Simulation: A Tool for the Analysis and Assessment of ITS Systems*. Highway Capacity Committee, Half Year Meeting, Lake Tahoe, 2001.
- [14] Krauss S.: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Ph.D. Thesis, University of Cologne, Germany, 1998.

- [15] Ranjitkar P., Nakatsuji T., Kawamura A.: *Car-following models: an experiment based benchmarking*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1582-1596, 2005.
- [16] Rakha H., Snare M., Dion F.: *Vehicle Dynamics Model for Estimating Maximum Light Duty Vehicle Acceleration Levels*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1883, pp. 40-49, 2004.
- [17] Rakha H., Lucic I., Demarchi S. H., Setti J. R., Van Aerde M.: *Vehicle Dynamics model for predicting maximum truck acceleration levels*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 127(5), pp. 418-425, 2001.