

Mariusz PORDZIK

Lesław SOCHA

## MODELE STEROWANIA POJAZDAMI NA TRZYPASMOWEJ AUTOSTRADZIE

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono trzy modele ruchu pojazdów na odcinku autostrady z możliwością zmiany pasa ruchu. W opisie matematycznym modeli zaproponowano algorytmy sterowania wykorzystujące teorię ruchu pojazdów nazywaną w literaturze „car-following”. W modelach przyjęto losowe chwile pojawiania się pojazdów, prędkości początkowe i zalecane. Utworzone algorytmy posłużyły do przeprowadzenia szeregu symulacji i zbadania skutków sterowania pojazdami. Przeprowadzono badania symulacyjne rozważanych modeli i porównano podstawowe wskaźniki statystyczne oceny ruchu.

## CONTROL MODELS OF VEHICLES ON THREE LANE HIGHWAY

**Summary.** Three models of traffic vehicles at segment highway with possibility change lane have been proposed in this paper. The proposed models were tested several sets of parameters by simulations and results obtained are illustrated in figures and tables.

### 1. WSTĘP

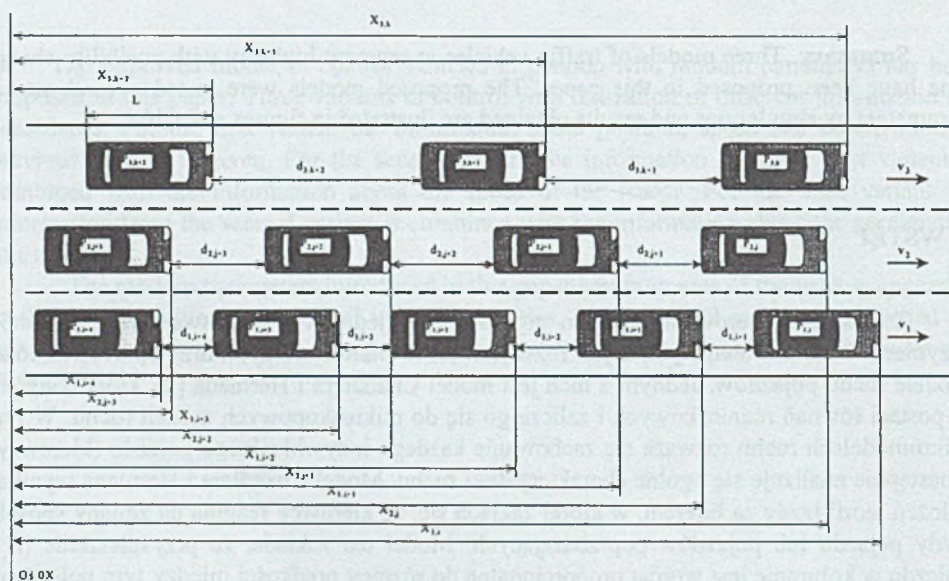
Zagadnienie sterowania ruchem pojazdów jest jednym z podstawowych problemów inżynierii ruchu. Problematyka ta jest rozwijana przez wielu badaczy, którzy opracowali różne modele ruchu pojazdów. Jednym z nich jest model Chandlera i Hermana [2], który dany jest w postaci równań różniczkowych i zalicza go się do mikroskopowych modeli ruchu. W tych mikromodelach ruchu rozważa się zachowanie każdego indywidualnego pojazdu (kierowcy), a następnie analizuje się ogólne charakterystyki ruchu. Model Chandlera i Hermana wynika z założeń teorii jazdy za liderem, w której zakłada się, że kierowcy reagują na zmiany sposobu jazdy pojazdu lub pojazdów poprzedzających. Model ten zakłada, że przyspieszenie  $(i+1)$  pojazdu w kolumnie jest wprost proporcjonalne do różnicy prędkości między tym pojazdem i pojazdem bezpośrednio go poprzedzającym. Innym podejściem do problemu ruchu pojazdów jest nieliniowy model dyfuzji Burgersa [5]. Burgers zaproponował rozpatrywanie ruchu w

zależności od maksimum przepustowości drogi. Przepustowość ta jest określona maksymalnym natężeniem, jakie może wystąpić w przekroju drogi, w zależności od gęstości pojawiających się pojazdów na wlocie. Najprostszą matematyczną postać takiej zależności opisuje się równaniem Greenshieldsa [3]. W modelu Kemera-Konhausera [6] ruch pojazdów na drodze uwarunkowany jest gęstościami i prędkościami pojazdów zależnych z jednej strony od przedziału czasu i z drugiej strony od przestrzeni na drodze. Powstał również model MIKROSYM [8], w którym korzysta się z modelu ruchu sformułowanego przez G. P. Gippsa [4]. Jednym z bardziej znanych modeli ruchu pojazdów jest model Bando [1], w którym dla ruchu drogowego wykorzystuje założenie, że przyspieszenie każdego pojazdu jest zdeterminowane bezpośrednio przez prędkość własną pojazdu i prędkość pojazdu poprzedzającego.

W cytowanych modelach wszystkie zależności mają charakter deterministyczny. Z uwagi na to, że w rzeczywistych sytuacjach drogowych występują zjawiska losowe, zachodzi konieczność ich uwzględnienia w modelach. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie trzech modeli ruchu pojazdów na odcinku autostrady z możliwością zmiany pasa ruchu z uwzględnieniem zarówno losowych chwil pojawiania się pojazdów, jak i losowych prędkości początkowych i nominalnych. Przy tworzeniu modelu drugiego i trzeciego wykorzystano pewne fragmenty modelu Gippsa [4].

## 2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA UTWORZONYCH MODELI

W niniejszej pracy będziemy rozpatrywali wycinek trzypasmowej autostrady, przy czym dla każdego pasa jest przypisana pewna prędkość znamionowa  $v_i$  ( $i=1,2,3$ ), co zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Sytuacja ruchowa na trzypasmowej jezdni autostrady  
Fig. 1. Traffic model of three lane highway



Pojazdy wjeżdżające na autostradę, zgodnie z ustawionymi parametrami generatora, numerowane są w kolejności ich pojawiania się, dla każdego pasa osobno. W sytuacji przedstawionej na rys. 1 pojazdy znajdują się w stanie ustalonym, po uporządkowaniu od momentu wjazdu na autostradę. Dla takiej sytuacji wyznaczono długości  $X_{1,i}$ ,  $X_{2,j}$ ,  $X_{3,k}$  dla pojazdu odpowiednio  $P_{1,i}$ ,  $P_{2,j}$ ,  $P_{3,k}$ , które określają, jaka jest odległość czoła pojazdu od umownego początku odcinka drogi, tutaj oznaczonego przez oś 0X. Długości  $d_{1,i}$ ,  $d_{2,j}$ ,  $d_{3,k}$  oznaczają długość luki znajdującej się przed pojazdem odpowiednio  $P_{1,i}$ ,  $P_{2,j}$ ,  $P_{3,k}$ , jaka dzieli go od pojazdu poprzedzającego. Długości pojazdów wynoszą  $L_i$ . Dla stanu ustalonego tworzymy tablicę stanu ustalonego TSU, która dla sytuacji z rys. 1 zostanie przedstawiona następująco:

$$TSU = \begin{bmatrix} P_{1,i} & - & - & P_{1,i+1} & - & - & P_{1,i+2} & - & P_{1,i+3} & - & - & P_{1,i+4} \\ - & - & P_j & - & P_{j+1} & - & - & P_{j+2} & - & - & P_{j+3} & - \\ - & P_k & - & - & - & P_{k+1} & - & - & - & P_{k+2} & - & - \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dla tablicy TSU tworzymy następnie tablicę odległości pojazdów TOP, która zmienia się dynamicznie z upływem czasu. Przykładowo dla sytuacji z rys. 1 tablica TOP będzie miała postać:

$$TOP = \begin{bmatrix} X_i & - & - & X_{i+1} & - & - & X_{i+2} & - & X_{i+3} & - & - & X_{i+4} \\ - & - & X_j & - & X_{j+1} & - & - & X_{j+2} & - & - & X_{j+3} & - \\ - & X_k & - & - & - & X_{k+1} & - & - & - & X_{k+2} & - & - \end{bmatrix} \quad (2)$$

W momencie kiedy odległość np. pojazdu  $P_{3,k}$  na pasie trzecim będzie większa niż odległość pojazdu  $P_{1,i}$  od osi 0X, wtedy w tablicy TSU kolumna k-ta zostanie wpisana w miejsce kolumny i-tej, a kolumna i-ta w miejsce kolumny k-tej, co umożliwia ocenę kolejności pojazdów na wszystkich pasach w dowolnej chwili czasu. Na podstawie TSU zostanie również zaktualizowana TOP.

Rozważamy możliwość przejazdu pojazdu  $P_{2,j+1}$  poruszającego się po pasie drugim, na którym pojazdy poruszają się z prędkością  $v_2$ , na sąsiedni pas trzeci, na którym pojazdy poruszają się z prędkością  $v_3$ . Manewr ten jest możliwy, gdy pojazd  $P_{2,j+1}$  przyspieszy i wtedy zajmie lukę  $d_{3,k+1}$  lub gdy zahamuje i wtedy zajmie lukę  $d_{3,k+2}$  na sąsiednim pasie. Manewr zajęcia luki na sąsiednim pasie jest związany z przyspieszeniem lub opóźnieniem jazdy.

### 3. MODEL STAŁYCH PRĘDKOŚCI (MSP)

W tym modelu pojazdy pojawiają się na każdym pasie zgodnie z wybranym rozkładem Poissona scharakteryzowanym wartością  $\lambda_i$  na każdym pasie. Pojazdy poruszają się ze stałymi, dla każdego pasa innymi, prędkościami. Odległości między pojazdami są więc stałe  $d_i = \text{const}$  i przyspieszenia są równe zero  $a_i = 0$ .

Celem algorytmu sterowania pojazdem jest przejazd na inny pas w jak najkrótszym czasie (nadrzędne kryterium) przy minimalnej ilości manewrów (pomocnicze kryterium).

ALGORYTM:

1. Inicjuj parametry algorytmu. Zeruj tablice TSU[i,j], TOP[i,j] i MC[i,j] oraz wektory V[j] i a[j]. Zeruj czas symulacji. Pojazd wybrany = false.
2. Odczytaj stan licznika czasu.



3. Sprawdź dla każdego pasa, czy odstęp czasu  $t_{gi}$  lub odstęp czasu wynikające z intensywności  $\lambda_i$  pojawiania się pojazdów w strumieniu Poissona spełniają warunki generowania pojazdu na  $i$ -tym pasie. Jeżeli warunek dla  $i$ -tego pasa jest spełniony, przejdź do 4. Jeżeli nie, to przejdź do punktu 9.
4. Sprawdź, czy odległość końca poprzedzającego pojazdu pozwala na pojawienie się przyszłego wygenerowanego pojazdu. Jeżeli warunek spełniony przejdź do 5, jeżeli nie, to przejdź do punktu 9.
5. Sprawdź, czy pojazd wybrany = true. Jeżeli tak, to rodzaj pojazdu = pojazd wybrany i przejdź do 7, jeżeli nie to przejdź do 6.
6. Wybierz losowo rodzaj pojazdu uwzględniając SRP.
7. Generuj pojazd.
8. Dopisz w tablicy TSU pojazd na pozycji  $[i,j+1]$ . Do tablicy TSU $[i,j+1]$  wpisz numer odpowiadający rodzajowi pojazdu. Do tablicy TOP $[i,j+1]$  wpisz wartość początkową odległości czoła pojazdu od umownego początku drogi równą zero. Do tablicy MC $[i,j+1]$  wpisz moment wygenerowania pojazdu jako wartość licznika czasu.
9. Przelicz wartości odległości pojazdów od początku odcinka drogi uwzględniając prędkości pojazdów i stan licznika czasu. Wpisz wartości do tablicy TOP.

$$X_{i,j}(t) = v_i \cdot t$$

10. Na podstawie TOP uszereguj TSU i MC.
11. Jeżeli wybrany pojazd = true, wykonuj 12, jeżeli nie, przejdź do punktu 21.
12. Jeżeli wybór pasa przeznaczenia pojazdu został wybrany manualnie, to przejdź do 15. Jeżeli pas przeznaczenia ma być generowany przez program, przejdź do punktu 13.
13. Wyznacz numer(y) pasa(ów), który(e) może zająć pojazd wybrany. Sprawdź, czy istnieje możliwość przejścia pojazdu na każdy z wybranych wcześniej pasów. Jeżeli istnieje tylko jedna możliwość, to przejdź do 15, jeżeli nie, to przejdź do 14.
14. Sprawdź, w jakim czasie od zakończenia manewru na  $i$ -tym pasie możliwe będzie przejście pojazdu na kolejny pas. Wybierz pas, dla którego czas ten jest mniejszy.
15. Sprawdź kryteria przejścia pojazdu na wybrany pas. Jeżeli kryteria są spełnione, przejdź do punktu 16, jeżeli nie, to przejdź do punktu 18.

$$d_k = X_{k-1} - (X_k + L_{k-1}) \geq d_{dop}$$

$$d_{k+1} = X_k - (X_{k-1} + L_k) \geq d_{dop}$$

16. Wykonaj manewr przejścia na sąsiedni wybrany pas przeznaczenia pojazdu wybranego korzystając z wzoru (3) dla przyspieszania i z wzoru (4) dla hamowania.

$$a_{2,j+1}(t) = w_1 \frac{[v_{2,j} - v_{2,j+1}]^k}{[d_{2,j+1}]^l} + w_2 \frac{[v_{3,k} - v_{2,j+1}]^m}{[d_{3,k+1}]^n} + w_3 \cdot a_{pi} \quad (3)$$

$$a_{2,j+1}(t) = -w_1 \frac{[v_{2,j+2} - v_{2,j}]^k}{[d_{2,j+2}]^l} - w_2 \frac{[v_{3,k+2} - v_{2,j+1}]^m}{[d_{3,k+2}]^n} + w_3 \cdot a_{pi} \quad (4)$$

$v_i(t)$  – prędkość pojazdu 'i' w czasie  $t$ ,  $a_i(t)$  – przyspieszenie pojazdu 'i' w czasie  $t$ ,  $a_{pi}$  – poprzednie przyspieszenie pojazdu 'i',  $w_1, w_2, w_3, k, l, m, n$  – parametry wymagające oszacowania,  $w_1, w_2, w_3$  – nazywamy współczynnikami wagowymi.

17. Wpisz wartości prędkości i przyspieszenia wybranego pojazdu do wektorów  $V[j]$  oraz  $a[j]$ . Sprawdź, czy wybrano pojazd do manewrów lub czy liczba wygenerowanych

pojazdów powiększona o 1 spełnia warunek pojawienia się pojazdu badanego na drodze. Jeżeli tak, to pojazd wybrany = true. Jeżeli liczba wybranych pojazdów przekroczyła 300, zapisz plik tablic TSU[i,j], TOP[i,j], MC[i,j], V[j], a[j] na dysku.

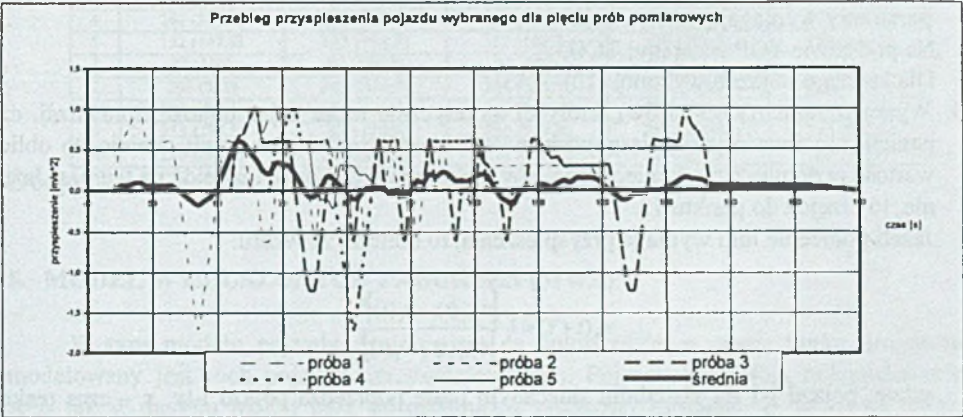
18. Zwiększ stan licznika czasu i wróć do punktu 2.

Tablica 1 przedstawia wpływ różnych ustawień warunków początkowych na czas wykonywania manewrów na autostradzie przez wybrany pojazd. Przeprowadzono pięć prób pomiarowych dla każdego z siedmiu zestawów danych. Na rys. 2 przedstawiono wykres średnich przyspieszeń (z każdych pięciu prób) wybranego pojazdu.

Tablica 1

Wyniki przeprowadzonych prób pomiarowych							
POMIARY	Lp. zestawu danych						
	1	2	3	4	5	6	7
Ustawienia generatora rozkładu Poissona							
pas1	0,10	0,12	0,15	0,30	0,40	0,30	0,20
pas2	0,12	0,15	0,18	0,40	0,30	0,20	0,15
pas3	0,15	0,18	0,22	0,50	0,20	0,15	0,12
SRP							
osobowe	100	50	50	50	50	50	50
osobowe z przyczepą	0	50	25	20	20	15	10
dosławcze	0	0	25	20	15	15	15
ciężarowe	0	0	0	10	10	10	15
TIR	0	0	0	0	5	10	10
Parametry drogi							
przyczepność							
normalna	tak	x	x	x	x	x	tak
mokra	x	tak	tak	x	x	tak	x
oblodzona	x	x	x	tak	tak	x	x
uszkodzona	x	x	x	x	x	x	x
widoczność							
normalna	tak	x	x	x	x	x	x
deszcz	x	tak	tak	tak	tak	tak	x
śnieg	x	x	x	x	x	x	x
mgła	x	x	x	x	x	x	tak
Prędkość na drodze [km/h]							
pas1	27	25	23	19	16	15	13
pas2	55	50	45	38	32	29	27
pas3	62	74	68	56	48	44	40
Wyniki							
pomiar 1	63	106	89	148	91	114	72
pomiar 2	96	70	125	435	146	172	153
pomiar 3	90	72	138	123	202	139	94
pomiar 4	58	64	113	151	80	93	166
pomiar 5	53	118	96	294	106	81	77

Źródło: Wyniki przeprowadzonych symulacji.



Rys. 2. Przebieg przyspieszenia badanego pojazdu w kilku próbach pomiarowych  
Fig. 2. Diagram of acceleration for the testing vehicle



#### 4. MODEL JAZDY ZA LIDEREM (MJL)

W tym modelu pojazdy pojawiają się tak jak w poprzednim modelu MSP, przy czym w czasie ruchu dążą do ustalenia zarówno określonej odległości do pojazdu poprzedzającego, jak i zalecanej prędkości. W algorytmie sterowania planuje się w przód dwa manewry wyprzedzające. W modelu założono, że: pojazdy pojawiają się tak jak w MSP, pojazdy w czasie ruchu dążą do ustalenia określonej odległości do pojazdu poprzedzającego i do osiągnięcia zalecanej prędkości, pojazdy planują dwa manewry wyprzedzające.

##### ALGORYTM:

1. Inicjuj parametry algorytmu. Zeruj tablice TCG[i,j], TOP[i,j], V[i,j] i a[i,j]. Zeruj czas symulacji.
2. Odczytaj stan licznika czasu.
3. Sprawdź dla każdego pasa, czy odstępy czasu, wynikające z intensywności  $\lambda_i$  pojawiania się pojazdów w strumieniu Poissona, spełniają warunki generowania pojazdu na i-tym pasie. Jeżeli warunek dla i-tego pasa jest spełniony, przejdź do 4. Jeżeli nie, to przejdź do punktu 7.
4. Sprawdź, czy odległość końca poprzedzającego pojazdu pozwala na pojawienie się przyszłego wygenerowanego pojazdu. Jeżeli warunek jest spełniony, przejdź do 5, jeżeli nie, to przejdź do punktu 7.
5. Wybierz losowo rodzaj pojazdu uwzględniając SRP.
6. Wybranemu pojazdowi przypisz  $v_a$ . Generuj pojazd. Dopisz do tablicy TCG[i,j+1] czas licznika w momencie wygenerowania pojazdu.
7. Przelicz wartości odległości pojazdów od początku odcinka drogi uwzględniając stan poprzedni odległości pojazdów i wartość obliczonego przyspieszenia dla każdego pojazdu. Wpisz wartości do tablicy TOP.

$$TOP[i, j] := TOP[i, j] + a_i(t)$$

gdzie:

$$a_i(t) = l_i \frac{[v_{i-1}(t) - v_i(t)]^m}{[x_{i-1}(t) - x_i(t)]^l}$$

gdzie: pojazd i-1 poprzedza pojazd i,  $x_i(t)$  – położenie czoła pojazdu 'i' w czasie 't',  $v_i(t)$  – prędkość pojazdu 'i' w czasie t,  $a_i(t)$  – przyspieszenie pojazdu 'i' w czasie t,  $l_i$ , m, l – parametry wymagające estymacji.

8. Na podstawie TOP uszereguj TCG.
9. Dla każdego pojazdu wykonuj (10) – (13).
10. Wyznacz numer(y) pasa(ów), który(e) teoretycznie może zająć pojazd. Sprawdź, czy istnieje możliwość przejścia pojazdu na zalecany sąsiedni pas. Jeżeli istnieje, to oblicz wartość przyspieszenia koniecznego, aby ten manewr wykonać i przejdź na ten pas. Jeżeli nie, to przejdź do punktu 12.

Jeżeli położenie łuki wymaga przyspieszenia, to obliczaj ze wzoru:

$$a_i(t + \tau) = l_i \frac{[v_{j-1}(t) - v_i(t)]^m}{[x_{j-1}(t) - x_i(t)]^l}$$

gdzie: pojazd j-1 na sąsiednim zalecanym pasie poprzedza pojazd i-ty,  $\tau$  – czas reakcji kierowcy,  $x_i(t)$  – położenie czoła pojazdu 'i' w czasie 't',  $v_i(t)$  – prędkość pojazdu 'i' w czasie t,  $x_{j-1}(t)$  – położenie końca pojazdu 'j-1' w czasie 't',  $v_{j-1}(t)$  – prędkość pojazdu 'j-1'



w czasie  $t$ ,  $a_i(t+\tau)$  – przyspieszenie pojazdu 'i' w czasie  $t+\tau$ ,  $l_i$ ,  $m$ ,  $l$  – parametry wymagające estymacji.

Jeżeli położenie luki wymaga hamowania, to obliczaj ze wzoru:

$$a_i(t+\tau) = -l_i \frac{[v_{j+1}(t) - v_i(t)]^n}{[x_{j+1}(t) - x_i(t)]^m}$$

gdzie: omawiany pojazd i-ty poprzedza pojazd j+1 na sąsiednim zalecanym pasie,  $x_{j+1}(t)$  – położenie czoła pojazdu 'j+1' w czasie 't', reszta oznaczeń jak poprzednio.

11. Sprawdź, w jakim czasie od zakończenia manewru na niezalecany pas będzie możliwe przejście na pas zalecany. Jeżeli czas jest mniejszy od czasu dopuszczalnego, to przejdź na ten pas. Wpisz wartości prędkości i przyspieszenia pojazdu do tablic  $V[i,j]$  oraz  $a[i,j]$  dla każdego pojazdu znajdującego się na autostradzie.
12. Jeżeli liczba wybranych pojazdów przekroczyła 300, zapisz plik tablic  $TOP[i,j]$ ,  $TCG[i,j]$ ,  $V[i,j]$ ,  $a[i,j]$  na dysku.
13. Zwiększ stan licznika czasu i wróć do punktu 2.

Przeprowadzono pięć serii po dziesięć symulacji dla każdego z dziesięciu zestawów danych, a wyniki prób zostały zapisane w tablicy 2. W pierwszej kolumnie tabeli kolejne numery oznaczają następujące ustawienia parametrów wejściowych modelu MJL:

1. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, stałe odstępy czasu: pas1 = 8s, pas2 = 12s, pas3 = 15s, zastosowano sterowanie,
2. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, stałe odstępy czasu: pas1 = 8s, pas2 = 12s, pas3 = 15s, brak sterowania,
3. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, stałe odstępy czasu: pas1 = 2s, pas2 = 5s, pas3 = 9s, zastosowano sterowanie,
4. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, stałe odstępy czasu: pas1 = 2s, pas2 = 5s, pas3 = 9s, brak sterowania,
5. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, generator Poissona:  $\lambda_1 = 0.10$ ,  $\lambda_2 = 0.12$ ,  $\lambda_3 = 0.15$ , zastosowano sterowanie,
6. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, generator Poissona:  $\lambda_1 = 0.10$ ,  $\lambda_2 = 0.12$ ,  $\lambda_3 = 0.15$ , brak sterowania,
7. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, generator Poissona:  $\lambda_1 = 0.40$ ,  $\lambda_2 = 0.42$ ,  $\lambda_3 = 0.46$ , zastosowano sterowanie,
8. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, generator Poissona:  $\lambda_1 = 0.40$ ,  $\lambda_2 = 0.42$ ,  $\lambda_3 = 0.46$ , brak sterowania,
9. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, generator Poissona:  $\lambda_1 = 0.40$ ,  $\lambda_2 = 0.40$ ,  $\lambda_3 = 0.40$ , zastosowano sterowanie,
10. SRP = 45 – 5 – 15 – 20 – 15, generator Poissona:  $\lambda_1 = 0.40$ ,  $\lambda_2 = 0.40$ ,  $\lambda_3 = 0.40$ , brak sterowania,

a w kolumnach kolejne uśrednione serie pomiarowe. Wyniki w tabeli wyrażają liczbę pojazdów rzeczywistych zaobserwowanych na autostradzie w czasie 10 min. W nawiasie podano liczbę pojazdów umownych.

Tablica 2

Lp.	1	2	3	4	5
1	165 (198)	166 (200,8)	165 (199,6)	169 (206,1)	171 (198,3)
2	163 (197,2)	160 (193,6)	160 (193,6)	166 (204,2)	163 (187,5)
3	273 (335,8)	275 (213,5)	278 (339,1)	279 (337,6)	270 (326,7)
4	245 (303,8)	245 (298,9)	248 (302,5)	247 (281,5)	251 (308,7)
5	132 (147,8)	133 (163,6)	132 (162,3)	138 (155,9)	139 (168,1)
6	92 (105)	90 (110,7)	87 (107)	95 (114,9)	92 (114)
7	266 (321)	265 (349,8)	266 (351,1)	265 (325,9)	268 (300,1)
8	222 (233,1)	229 (302,2)	230 (303,6)	225 (272,2)	212 (239,5)
9	255 (280,5)	255 (293)	250 (287,5)	252 (289,8)	271 (336,1)
10	226 (246,3)	215 (247,2)	214 (246,1)	229 (265,6)	231 (291)

Źródło: Wyniki przeprowadzonych symulacji.

## 5. MODEL WYMUSZONYCH ZABURZEŃ (MWZ)

W tym modelu pojazdy znajdują się na autostradzie w stanie korka drogowego i modelowany jest ruch pojazdu uprzywilejowanego. Pojazdy kontrolują odległości między sobą jak w modelu MJL i dążą do osiągnięcia prędkości zalecanej. Z uwagi na to, że po uporządkowaniu pojazdów na wszystkich pasach nie ma możliwości przejścia na inny pas, więc pojazd uprzywilejowany wysyła informacje do pojazdów otaczających go o zamiarze



manewrowania, w ten sposób powoduje zaburzenie w swoim otoczeniu, co z kolei powoduje wytworzenie się luk potrzebnych do zmiany pasa ruchu. Celem sterowania jest osiągnięcie przez pojazd uprzywilejowany pasa pierwszego. W modelu założono, że pojazdy znajdują się na autostradzie w stanie korka drogowego, pojazdy kontrolują odległości między sobą jak w modelu MJL i dążą do osiągnięcia prędkości zalecanej, pojazd wyznacza się jak w MSP.

ALGORYTM:

1. Inicjuj parametry algorytmu. Zeruj tablice TCG[i,j], TOP[i,j], V[i,j] i a[i,j]. Zeruj czas symulacji.
2. Odczytaj stan licznika czasu.
3. Sprawdź dla każdego pasa, czy odstępy czasu, wynikające z intensywności  $\lambda_i$  pojawiania się pojazdów w strumieniu Poissona, spełniają warunki generowania pojazdu na i-tym pasie. Jeżeli warunek dla i-tego pasa jest spełniony, przejdź do 4. Jeżeli nie, to przejdź do punktu 6.
4. Sprawdź, czy odległość końca poprzedzającego pojazdu pozwala na pojawienie się przyszłego wygenerowanego pojazdu. Jeżeli warunek jest spełniony, przejdź do punktu 5, jeżeli nie, to przejdź do punktu 6.
5. Wybierz losowo rodzaj pojazdu uwzględniając SRP. Pojazdowi przypisz  $v_{zi}$ . Generuj pojazd. Dopisz do tablicy TCG[i,j+1] czas licznika w momencie wygenerowania pojazdu.
6. Przelicz wartości odległości pojazdów od początku odcinka drogi uwzględniając stan poprzedni odległości pojazdów i wartość obliczonego przyspieszenia dla każdego pojazdu. Wpisz wartości do tablicy TOP.

$$TOP[i, j] := TOP[i, j] + a_i(t)$$

gdzie:

$$a_i(t) = l_i \frac{[v_{i-1}(t) - v_i(t)]^{p,8}}{[x_{i-1}(t) - x_i(t)]^{p,8}}$$

7. Sprawdź, czy wyznaczono pojazd. Jeżeli tak, przejdź do punktu 8. Jeżeli nie, przejdź do punktu 11.
8. Obliczaj ilość pojazdów przed pojazdem wybranym niezbędnych do udziału w manewrze zmiany pasa ruchu. Dodawaj odległości między pojazdami i odejmuj odległości minimalne tak długo, aż zostanie uzyskana wartość luki potrzebna wybranemu pojazdowi na manewr. Rozpocznij hamowanie wybranego pojazdu. Wykonuj punkt 9 dla pojazdów na sąsiednim pasie jadących przed pojazdem wybranym.
9. Przekaz informację o rozpoczęciu hamowania pojazdowi na sąsiednim pasie występującym za pojazdem wybranym.
10. Sprawdzaj, czy istnieje możliwość przejścia wybranego pojazdu na sąsiedni pas. Jeżeli istnieje, to oblicz wartość przyspieszenia koniecznego, aby ten manewr wykonać i przejdź na ten pas. Jeżeli nie, to przejdź do punktu 11.

Jeżeli położenie luki wymaga przyspieszenia, to obliczaj ze wzoru:

$$a_i(t + \tau) = 1,2 \frac{[v_{j-1}(t) - v_i(t)]^{p,0}}{[x_{j-1}(t) - x_i(t)]^{p,8}}$$

Jeżeli położenie luki wymaga hamowania, to obliczaj ze wzoru:

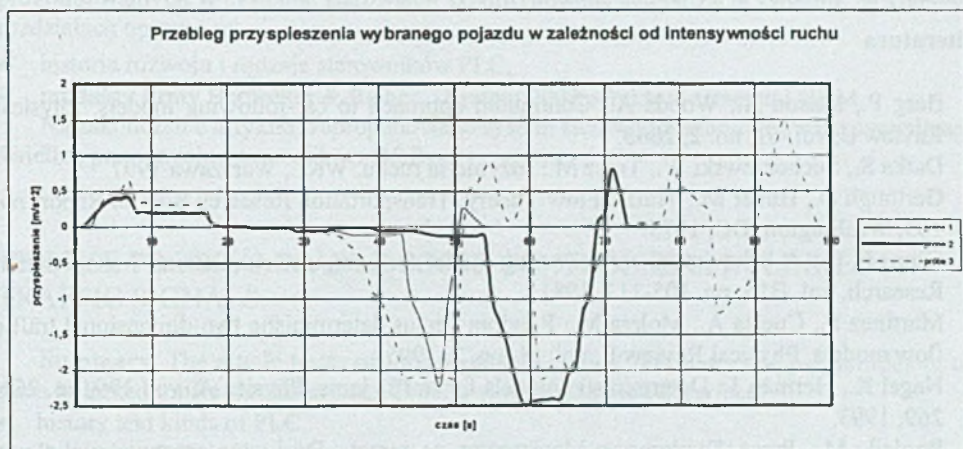
$$a_i(t + \tau) = -1,2 \frac{[v_{j+1}(t) - v_i(t)]^{p,0}}{[x_{j+1}(t) - x_i(t)]^{p,8}}$$

11. Dla pozostałych pojazdów wykonuj punkty 12 – 15.



12. Wyznacz numer(y) pasa(ów), który(e) teoretycznie może zająć pojazd. Sprawdzaj, czy istnieje możliwość przejścia pojazdu na zalecany pas. Jeżeli istnieje, to oblicz wartość przyspieszenia koniecznego, aby ten manewr wykonać i przejdź na ten pas. Jeżeli nie, to przejdź do punktu 14.
13. Sprawdź, w jakim czasie od zakończenia manewru na niezalecany pas będzie możliwe przejście na pas zalecany. Jeżeli czas jest mniejszy od czasu dopuszczalnego, to przejdź na ten pas. Wpisz wartości prędkości i przyspieszenia pojazdu do tablic  $V[i,j]$  oraz  $a[i,j]$  dla każdego pojazdu znajdującego się na autostradzie.
14. Jeżeli liczba wybranych pojazdów przekroczyła 300, zapisz plik tablic  $TOP[i,j]$ ,  $TCG[i,j]$ ,  $V[i,j]$ ,  $a[i,j]$  na dysku.
15. Zwiększ stan licznika czasu i wróć do punktu 2.

Na rys. 3 przedstawiono przebieg przyspieszenia pojazdu wybranego, który przy zwiększającej się intensywności ruchu ulega większym wahaniom (próba 1 dla małej intensywności, próba 3 dla bardzo dużej intensywności). Ponadto czas wykonania zadania maleje przy malejącej intensywności pojawiania się pojazdów.



Rys. 3. Przebieg przyspieszenia wybranego pojazdu  
Fig. 3. Diagram of acceleration for the testing vehicle

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono trzy modele ruchu pojazdów na odcinku autostrady z możliwością zmiany pasa ruchu. Analiza wyników symulacji dla modelu MSP pozwala stwierdzić, że czas wykonania zadania jest najniższy przy prędkościach optymalnych, które w badanym modelu wynoszą 40 km/h, 75 km/h i 100 km/h odpowiednio dla pasa pierwszego, drugiego i trzeciego. Zastosowanie sterowania powoduje, że przebieg przyspieszenia i prędkości wybranego pojazdu wykazuje mniejsze wahania niż w sytuacji braku sterowania. Istotny wpływ na płynność ruchu ma ruch pojazdów ciężarowych. Udział procentowy samochodów ciężarowych do 5% nie powoduje znacznych różnic w czasie wykonania zadania, jednak przy udziale rzędu 30% czas wykonywania zadania podwoił się. Stosowanie modeli car-following ma sens przy  $0 < \lambda < 0,5$  w strumieniach Poissona. Zastosowanie modelu MJL powoduje zwiększenie przepustowości odcinka drogi nawet o 34%, a średnio o 15%



biorąc pod uwagę pojazdy rzeczywiste oraz odpowiednio 33% i 13% dla pojazdów umownych. Sterowanie jest szczególnie skuteczne przy dużej gęstości ruchu. Model MJL pozwala na 'pakowanie' pojazdów. Wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistych występują przy ustawieniu parametrów modelu MJL odpowiednio  $l_1 = (1-4)$ ,  $m = 1.8$ ,  $l = 0.8$ . Model MWZ pokazuje, że przy prędkości poniżej 30 km/h wybrany pojazd nie mógł swobodnie zmieniać pasa ruchu. Intensywność  $\lambda = 0.45$  obrazuje dużą gęstość pojazdów i wtedy manewry wybranego pojazdu są możliwe dopiero od prędkości 45 km/h. Dla średniej prędkości zalecaney pojazdów na równej 30 km/h, do zmiany pasa ruchu przez wybrany pojazd trzeba zaangażować od 15 do 27 pojazdów, podczas gdy dla prędkości 90 km/h już tylko od 3 do 5 pojazdów.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych prób symulacyjnych dla wszystkich modeli można stwierdzić, że sterowanie ruchem pojazdów poprawia warunki ruchu pojazdów poprzez zwiększenie przepustowości odcinka autostrady, zmniejszenie czasu potrzebnego na jego pokonanie oraz bezpieczne zjechanie pojazdów z drogi. Dokładniejszą analizę wyników można znaleźć w pracy [7].

## Literatura

1. Berg P., Mason A., Woods A.: Continuum approach to car-following models, *Physical Review E*, vol. 61, no. 2, 2000.
2. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu, WKŁ, Warszawa 1997.
3. Gerlough D., Huber M.: Traffic Flow Theory, *Transportation Research Special Report no. 165*, Washington, DC, 1975.
4. Gipps P. G.: A behavioural car-following model for computer simulation, *Transportation Research*, vol. B15, pp. 105-111, 1981.
5. Martinez F., Cuesta A., Molera M.: Random versus deterministic two-dimensional traffic flow models, *Physical Review E*, vol. 51, no. 2, 1995.
6. Nagel K., Herman J.: Deterministic models for traffic jams, *Physica A*, vol. 199, pp. 254-269, 1993.
7. Pordzik M.: Praca Dyplomowa-Magisterska na temat „Dyskretno-czasowy nieliniowy model grupy pojazdów kołowych, Politechnika Śląska, Katowice 2000.
8. Wołyńska B., Piotrowski J.: Symulacyjny model ruchu na wielopasowej jezdni – MIKROSYM, Kraków 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. Władysław Kulpa

## Abstract

Three models of traffic vehicles at a segment highway with the possibility of change lanes have been proposed in this paper. The car-following mathematical models are combined with random parameters models. In the first model the new formulas for vehicle accelerations during the maneuver of lane changing are proposed. In the second and third models the corresponding Gipps formulas [4] are modified. The random parameters introduced in this paper are: moments of vehicle appearing in the system, initial and nominal vehicle velocities. The proposed models were tested on several sets of parameters by simulations and results obtained are illustrated in figures and tables.