

Jolanta GOŁOSZ, Jan PIECHA, Bartłomiej PŁACZEK

SYMULACJA STRUMIENI POJAZDÓW W OBREMBIE AGLOMERACJI MIEJSKIEJ ZA POMOCĄ AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono komórkowy model systemu zarządzania potokami ruchu w aglomeracji miejskiej, będący daleko idącą modyfikacją modelu Nalega – Schrekenberga (NaSch) [1], [4], [5]. Jest to kolejny etap badań statutowych Zakładu Informatyki Transportu. Model był wykorzystywany do zapisu danych o ruchu drogowym oraz symulacji przemieszczeń pojazdów w sieci dróg miejskich. Poziom symulacji stanu obciążenia jezdni podniesiony został do większych odcinków jezdni, zwanych makrokomórkami. Z każdym zadaniem sterowania skrzyżowaniem dróg wiąże się określone straty czasu, pochodzące od naturalnego włączania pojazdów do ruchu oraz od trudnych do oszacowania losowych reakcji kierowców. Operowanie większym od prostej komórki odcinkiem jezdni oznacza pewien niedomiar zajętości jednostki miary dla obciążenia ruchu. Błąd definicji stanu układu jest odnoszony (porównywalny) do błędu sterownia wynikającego ze strat na każdym ze skrzyżowań. Uzyskujemy pewne uśrednienie charakterystyk ruchu pojazdów.

THE IN-TOWN TRAFFIC VEHICLES STREAM SIMULATION USING CELLULAR AUTOMATA

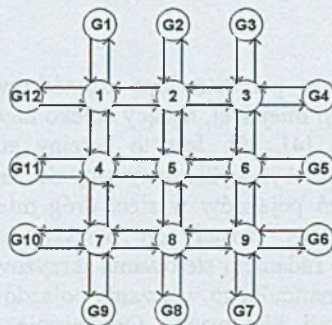
Summary. The paper presents the cellular approach to a management of an in-town means of transport, as a current part of a status research works in the Department of Transport Informatics. The model is a far going modification of a well known method of Nagel and Schrekenberg (NaSch) [1], [4], [5] used for in-town transportation means flow simulation. The simulation level increased into a bigger scale then it was previously defined for a single crossroad. The basic unit of a traffic vehicles measures was called macro-cell. The control procedures are joined with a defined value of a wasting time that comes from natural junction of the car moving vehicle and from probabilistic reactions of driver's with a length difficult to define. Operating on an bigger scale of a traffic band surface, a traffic load can not be properly recorded. The fault of the simulation, for a control procedures, is comparable with the fault of that noticed on each crossroad. This way a kind of medium value measures for characteristics of vehicles movement have been obtained.

1. WPROWADZENIE

Przedstawiony w opracowaniu model makrokomórkowy pozwala zdefiniować podstawowe miary dla strumieni pojazdów w systemie zarządzania potokami ruchu. W modelu wykorzystano znaną metodę symulacji ruchu drogowego, opracowaną przez Nalega i Schrekenberga [1]. W modelu zaproponowano uśrednienie prędkości i czasu przejazdu na

odcinku międzywęzłowym. Uśredniony stan zajętości odcinka jezdni zdefiniowano jako miara obciążenia sieci.

Model symulatora makrokomórkowego zaproponowano jako narzędzie analizy parametrów ruchu pojazdów i zasad dynamicznej nawigacji pojazdów w obszarze dużej aglomeracji miejskiej. Model makrokomórkowy ruchu pojazdów opracowano dla sieci drogowej zawierającej określoną liczbę węzłów i połączeń między nimi. Kierunki jazdy opisuje graf skierowany, przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Graf skierowany modelu sieci drogowej

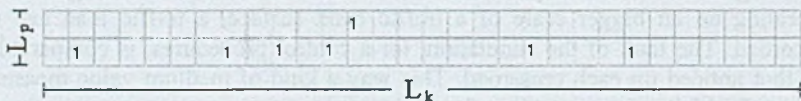
Fig. 1. The oriented graph of a road network

Łuki grafu odpowiadają poszczególnym odcinkom międzywęzłowym, reprezentującym dwupasowe dwukierunkowe połączenia o założonej długości 225 m. Węzły od 1 do 9 odpowiadają skrzyżowaniom, natomiast węzły opisane numerami od G1 do G12 nazwano węzłami generująco – absorbującymi, w których ma miejsce wprowadzanie pojazdów do sieci lub ich wyprowadzanie (opuszczenie).

2. MAKROKOMÓRKOWE MODELOWANIE RUCHU DROGOWEGO

2.1. PODSTAWOWE DEFINICJE

Każdy odcinek międzywęzłowy został przedstawiony jako dwuwymiarowy automat komórkowy składający się z sieci komórek, o rozmiarze określonym parametrem L_p – liczbą pasów ruchu oraz L_k – liczbą komórek przypadającą na pojedynczy pas ruchu (rys. 2).



Rys. 2. Odcinek międzywęzłowy w modelowanej sieci

Fig. 2. The road network unit between two nodes

Wartość L_p przyjęto równą 2, odpowiadającą zamodelowanym odcinkom między węzłowym, składającym się z dwóch pasów ruchu, w jednym kierunku. Wartość L_k została wyznaczona ze wzoru:

$$L_k = \frac{d_{ij}}{7,5}, \quad (1)$$

gdzie d_{ij} – długość odcinka z węzła i do j [m].

Stan komórki automatu, nr x na pasie y - $S_{x,y}$, gdzie $x = 1, \dots, L_k$, $y = 1, \dots, L_p$, przedstawiający odcinek d_{ij} , może przyjmować jedną z wartości zbioru dwuelementowego $\{0, 1\}$. Wartość 0 oznacza, że komórka wskazana indeksem (x, y) jest pusta, 1 – komórka jest zajęta.

Pojazdy są wprowadzane do sieci przez tzw. węzły generujące do komórek bezpośrednio im przyległych. Wpisywanie pojazdu do sieci związane z elementem prawdopodobieństwa p , dostępu do najbliższej przyległej komórki. W chwili wprowadzenia pojazdu do komórki jego prędkość jest równa 0.

Ustalanie stanów komórek $S_{x,y}$ (0 lub 1) w kolejnych krokach iteracyjnych jest nierozłącznie związane z wyznaczeniem prędkości pojazdów oraz współrzędnych położenia x i y . Obecność pojazdu w komórce jest zapisywana wartością $S_{x,y} = 1$.

Każdy pojazd opisany jest za pomocą parametru v_i – prędkość w i – tym kroku iteracji liczona w [k/i] (komórkach na iterację). Przemieszczenie pojazdu polega na wyznaczeniu zgodnie z regułami ruchu pojazdów prędkości $v_i + 1$ w kolejnym kroku czasowym oraz położenia $S_{x,y}$ – komórki w automacie komórkowym. Do opisu ruchu pojazdów w sieci transportowej wykorzystano teorię automatów komórkowych, zaproponowaną do opisu pojedynczych skrzyżowań w metodzie NaSch i pojedynczego pasa ruchu [1]. Pas ruchu podzielono na komórki o długości 7,5 m. Każdy pojazd (i) posiada prędkość nie mniejszą od zera i nie większą od ustalonej prędkości maksymalnej $v_i = 0, 1, \dots, v_{max}$. Prędkość mierzona jest liczbą komórek przebytych przez pojazd w jednostce czasu.

Ruch pojazdów opisany jest regułą składającą się z kolejnych kroków, wykonywanych równolegle dla wszystkich pojazdów.

Przyspieszanie: ma miejsce, gdy prędkość pojazdu v_i jest mniejsza od v_{max} i jeżeli odległość od następnego pojazdu nie jest mniejsza od odstępu g_i . Wtedy prędkość jest zwiększana o jeden ($v_i \rightarrow v_{i+1}$).

Zwalnianie: jest przypadkiem blokowania pojazdu przez innych użytkowników pasa; prędkość pojazdu v_i jest nie większa od v_{max} , a odległość od następnego pojazdu jest mniejsza od g_i . Gdy dla pojazdu w komórce $i + 1$, $v_{i+1} \leq v_i$, wówczas pojazd w komórce i zmniejsza prędkość do wartości v_{i+1} .

Zmienna losowa: dotyczy losowego zmniejszania prędkości pojazdów.

Do modelu sieci wprowadzone zostały warunki do zmiany pasa ruchu, modelujące ruch pojazdów na drogach dwupasowych:

(1) Zmiana pasa ruchu następuje w rezultacie analizy, czy istnieje dostateczny odstęp pozwalający zwiększyć prędkość v_i . Jeśli nie, następuje przejście do badania warunku nr 2.

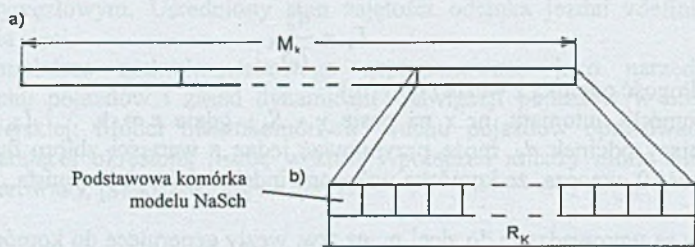
(2) Analiza stanu pasa sąsiedniego, czy na tym pasie dysponujemy odpowiednim odcinkiem jezdni pozwalającym zmianę pasa ruchu i utrzymanie lub zwiększenie jego aktualnej prędkości.

(3) Ocena odstępu za pojazdem w celu przyspieszenia jazdy, przy nadmiernym odstępie z przodu i braku odstępu z tyłu pojazdu, w celu uniknięcia zakłócenia ruchu innych pojazdów.

Wymienione reguły zmian pasów ruchu związane są z procedurą minimalizacji czasów przejazdu w celu wyznaczenia trasy przejazdów o najmniejszych kosztach.

Definicja 1. Makrokomórka jest to wielokrotność podstawowej komórki modelu NaSch. Jej rozmiar R_k definiuje liczba komórek podstawowych modelu NaSch, wchodzących w jej skład.

Wprowadzone pojęcie makrokomórki (dużej komórki) oznacza analizę obciążenia pasa ruchu w skali potoków pojazdów obszaru większego miasta (rys.3).



Rys. 3 a). Pas ruchu podzielony na M_k makrokomórek, b) pojedyncza makrokomórka o rozmiarze R_k
 Fig. 3 a). Traffic lane with M_k macro-cells b) single macro-cell, size R_k

W prezentowanym przykładzie przyjęto $R_k = 10$ [k]. Przyjęto również, że jest to wartość odpowiadająca średnim wartościom parametrów ruchu drogowego, wiernie odwzorowująca rzeczywiste czasy przemieszczania się potoków pojazdów (grup pojazdów).

Liczbę makrokomórek M_k mieszczących się między węzłami pasa ruchu można wyznaczyć z zależności:

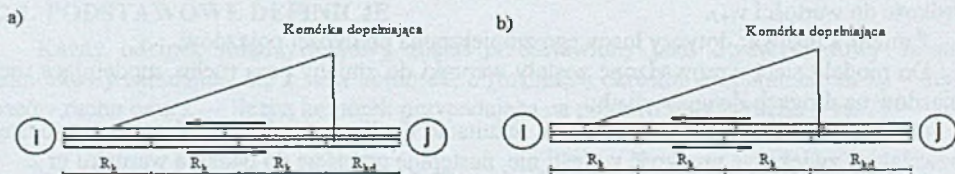
$$M_k = \left\lfloor \frac{L_k}{R_k} \right\rfloor, \quad (2)$$

gdzie:

- L_k – długość odcinka międzywęzłowego wyrażona w komórkach modelu NaSch,
- R_k – przyjęty rozmiar mikrokomórki.

Gdy długość odcinka międzywęzłowego L_k nie stanowi dokładnej wielokrotności R_k rozmiaru makrokomórki – $L_k \bmod R_k \neq 0$, na odcinku międzywęzłowym pozostaje liczba wolnych komórek (dla $R_k=10$ od 1 do 9 komórek), nie wchodzących w skład żadnej z makrokomórek. Dla takiego przypadku przyjmuje się inne rozwiązanie.

Definicja 2. Jeżeli liczba wolnych komórek stanowi min 80% (przykładowa wartość progowa) rozmiaru makrokomórki: $L_k \bmod R_k \geq 0,8R_k$, utworzona zostaje makrokomórka „dopełniająca” o rozmiarze: $R_{kd} = L_k \bmod R_k$. Makrokomórka dopełniająca położona jest na końcu odcinka międzywęzłowego – rys. 4 a.



Rys. 4. Rozmieszczenie makrokomórek dopełniających na odcinku międzywęzłowym i, j: a) $L_k \bmod R_k \geq 0,8R_k$, b) $L_k \bmod R_k \leq 0,2R_k$
 Fig. 4. Additional macro-cells arrangement in link i, j: a) $L_k \bmod R_k \geq 0,8R_k$, b) $L_k \bmod R_k \leq 0,2R_k$

Definicja 3. Jeżeli liczba wolnych komórek nie przekracza 20% rozmiaru podstawowej makrokomórki – $L_k \bmod R_k \leq 0,2R_k$, wolne komórki zostają dołączone do ostatniej mikrokomórki, tworząc makrokomórkę dopełniającą nadmiarową o rozmiarze $R_{kd} = L_k \bmod R_k$ – rys. 4b.

Jeżeli liczba wolnych komórek nie spełnia założeń 1 lub 2, przeprowadzona zostaje ponowna iteracja podziału pasa ruchu dla większej o 1 komórkę wartości R_k i ponowne wyliczenie M_k . Procedura jest powtarzana do momentu znalezienia odpowiedniego

współczynnika podziału R_k dla definicji rozmiaru makrokomórek (odpowiednio do definicji 1, 2 i 3).

Przyjęta definicja (4) opisu stanu pasa ruchu oznacza, że parametry makrokomórki nie przyjmują wartości dyskretnych, jak to ma miejsce dla podstawowych form automatu komórkowego.

Definicja 4. Stan obciążenia bieżącej makrokomórki jest wartością wyliczaną na podstawie liczby i predkości pojazdów znajdujących się w jej obszarze.

Dla każdej makrokomórki wyliczana jest średnia prędkość jazdy, która wyznacza średni czas przejazdu przez pojedynczą makrokomórkę; t_{srm} wyliczamy ze wzoru:

$$t_{srm} = \frac{R_k}{V_{sr}}, \quad (3)$$

gdzie:

R_k – długość makrokomórki [k],

V_{sr} – średnia prędkość przejazdu makrokomórki [k/i],

Natomiast średnia prędkość przejazdu przez makrokomórkę V_{sr} obliczana jest ze wzoru:

$$V_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i + PojR \cdot V_{MAX}}{n + PojR}, \quad (4)$$

gdzie:

v_i – prędkość i – tego pojazdu znajdującego się w makrokomórkce [k/i]

V_{MAX} – maksymalna prędkość, z jaką poruszają się pojazdy,

n – liczba pojazdów w makrokomórcie,

$PojR$ – liczba dodatkowych pojazdów, które mogłyby się poruszać z V_{MAX} w makrokomórcie, wyznaczona z zależności:

$$PojR = Reszta \text{ div } (V_{Max} + 1), \quad (5)$$

gdzie:

Reszta oznacza rezerwę komórek dla pojazdów dodatkowych, które nie spowodują zakłócenia ruchu pojazdów znajdujących się w makrokomórcie :

$$Reszta = R_k - \left(\sum_{i=1}^n v_i + n \right), \quad (6)$$

gdzie:

R_k – rozmiar makrokomórki,

n – liczba pojazdów w makrokomórcie,

v_i – prędkość i – tego pojazdu w makrokomórcie.

Dla jazdy w jednym kierunku średni czas przejazdu całego odcinka t_{srp} wyznacza wzór:

$$t_{srp} = \sum_{m=1}^{M_k} t_{srm}, \quad (7)$$

gdzie t_{srm} – średni czas przejazdu m – tej makrokomórki na pasie.

Średni czas przejazdu całego odcinka oblicza się ze wzoru:

$$T_{sr} = \frac{\sum_{p=1}^{L_p} t_{srp}}{L_p}, \quad (8)$$

gdzie:

L_p – liczba pasów ruchu,

t_{srp} – czas przejazdu na pasie p .

2.2. DYNAMICZNE WYZNACZANIE TRASY PRZEJAZDU

Kolejnym elementem badań symulacyjnych jest wyznaczenie tras przejazdu przy uwzględnieniu dynamicznych zmian stanu sieci. Wyznaczone czasy stają się parametrami macierzy kosztów w całej sieci drogowej. Elementy macierzy zawierają koszt/czas przejazdu odcinków drogi z węzła i do j . Bieżące zmiany liczby pojazdów w sieci oznaczają dynamiczne zmiany elementów macierzy kosztów. W każdym kroku czasowym automatu komórkowego następuje bieżąca modyfikacja parametrów trasy przejazdu wyznaczanych na podstawie algorytmu Dijkstry.

Najniższe koszty opisuje ścieżka pomiędzy dwoma określonymi punktami i oraz j , dla której czas przejazdu jest najkrótszy:

$$T = \{T_{ij}\}, T_{opt} = \min\{T\}, \quad (9)$$

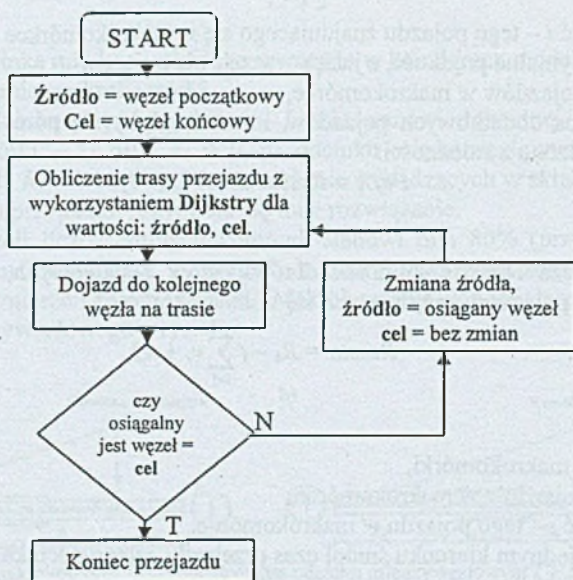
gdzie:

T_{ij} – czasy przejazdu odcinka z węzła j do i ,

T – zbiór określający czasy przejazdu dla zadanej ścieżki,

T_{opt} – minimalny czas przejazdu.

Pojazd wprowadzany do sieci ma określony węzeł początkowy (źródło) oraz węzeł końcowy (cel). Na tej trasie wyznaczony zostaje minimalny czas z macierzy kosztów sieci (rys.5).



Rys.5. Algorytm wyznaczenia trasy przejazdu dla pojazdów kierowanych dynamicznie
Fig.5. The routing algorithm for dynamically controlled vehicles

Badania symulacyjne przeprowadzono również dla pojazdów kierowanych statycznie w celu porównania ich kosztów transportu z przypadkiem dynamicznego kierowania pojazdów. Pojazdy wprowadzane są do sieci losowo, uzyskując dynamiczne zakłócenia ruchu.

Dla statycznego modelu ruchu pojazdów wyliczano czasy przejazdu również według algorytmu Dijkstry, korzystając ze statycznej macierzy odległości.

3. WYNIKI SYMULACJI

Opisany model zaimplementowano w środowisku DELPHI 7. Symulator realizuje następujące zadania:

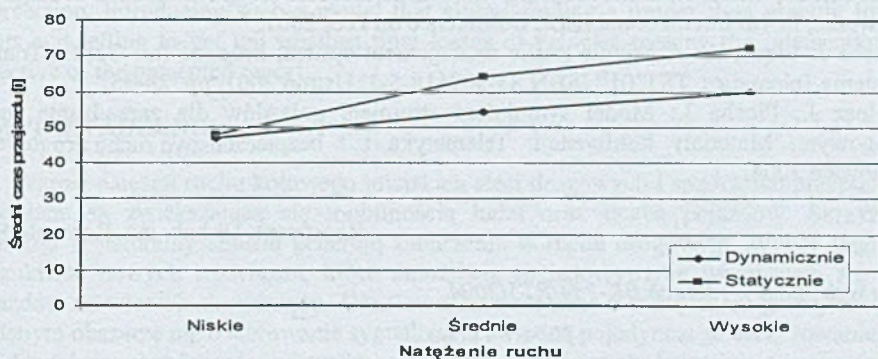
- symulację ruchu drogowego w zadanej sieci,
- kierowanie pojazdów statyczne,
- kierowanie pojazdów dynamiczne,
- prezentację zmian stanu automatu komórkowego,
- tworzenie wykresów zajętości odcinków drogi,
- tworzenie wykresów średnich prędkości dla poszczególnych odcinków drogi,
- ocenę parametrów symulacji (czas wykonywania obliczeń).

W celu dokonania oceny efektywności sposobu kierowania pojazdów w sieci przeprowadzono symulację ruchu pojazdów. Do zamodelowanego ruchu drogowego wprowadzono pojazdy kierowane statycznie oraz dynamicznie.

Głównym kryterium wyboru trasy dla pojazdów kierowanych statycznie była odległość, natomiast dla pojazdów kierowanych dynamicznie minimalny czas przejazdu trasy, wyliczony na podstawie danych z modelu makrokomórkowego.

Pomiaru dokonano dla dwóch grup 30 pojazdów (kierowanych statycznie i dynamicznie) wprowadzonych do sieci w takich samych warunkach ruchu. Dokonano pomiaru dwóch czynników decydujących o efektywności danego sposobu kierowania: czasu przejazdu oraz średniej prędkości. Wartości zestawiono w tab. 1, 2, 3. Droga przejazdu prowadziła od 1 do 9 węzła, pomiędzy którymi odległość wynosi 120 komórek (lub 900 m).

Na rysunku 6 przedstawiono wykres ilustrujący wyniki symulacji; zależności średniego czasu przejazdu od natężenia ruchu pojazdów kierowanych statycznie i dynamicznie.



Rys. 6. Wykres zależności czasu przejazdu zadanej trasy od obciążenia sieci drogowej

Fig. 6. Dependency between journey time and traffic volume

4. PODSUMOWANIE

Badania symulacyjne skuteczności zaproponowanego modelu komórkowego wykazują prawidłowość dla czasów przejazdu pojazdów kierowanych dynamicznie. Są one wyraźnie niższe od czasów przejazdu pojazdów kierowanych statycznie. Dla niskiego obciążenia ruchu w sieci różnica ta jest znikoma, co uzasadnia fakt, że straty czasu przejazdu odcinka przy

takim obciążeniu są praktycznie równe zero, gdy dla średniego i dużego obciążenia sieci widać wyraźne zalety dynamicznego zarządzania potokami pojazdów. Ich koszty (czasy) przejazdu pomiędzy wybranymi węzłami w sieci są niższe niż pojazdów kierowanych statycznie.

Przedstawiony w artykule model makrokomórkowy umożliwia bieżącą analizę stanu obciążenia sieci transportowej z wszystkimi zjawiskami jego dynamicznych zmian.

Zapisane w modelu dane można wykorzystać do analiz topologicznych sieci transportowej (w tym wyszukiwanie optymalnego połączenia). Model jest również skuteczny do oceny walorów użytkowych dróg czy wyznaczania optymalnych tras połączeń z monitorowaniem miejsc szczególnych zagrożeń dla ruchu drogowego.

Literatura

1. Wahle J., Annen O., Schuster Ch., Neubert L., Schreckenberg M.: A dynamic route guidance system based on real traffic data, Euro. J. Op. Res., 74-80, 2001.
2. Tracz M i inni (pod red.): Raport z badań „Modelowanie procesów ruchu”, Kraków CPBP 02.19, 1990. Politechnika Krakowska.
3. Gołosz J.: Systemy dyspozytorskie - teoria i rozwiązania praktyczne. Praca dyplomowa, Instytut Transportu Pol. Śl., Katowice 2002.
4. Gołosz J.: Model systemu zarządzania ruchem drogowym z zastosowaniem automatów komórkowych. Rejestracja i przetwarzanie danych w telematycznych systemach transportu, praca zbiorowa pod red. Jana Piechy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
5. Płaczek B.: Model węzła drogowego z zastosowaniem automatów komórkowych. Praca dyplomowa, Instytut Transportu Pol. Śl., Katowice 2002.
6. Chrobok R., Wahle J., Schreckenberg M.: Traffic forecast using simulations of large scale networks, in 4th International IEEE Conference on ITS, 2001.
7. Piecha J. Wąsik R.: A vehicle traffic management system, Proc. of Int. Conf. „Transport Systems Telematics, TST'01” ISBN 83-909518-5-1; Ustroń 2001, pp. 28-35.
8. Gołosz J., Piecha J.: Model symulatora strumieni pojazdów dla zarządzania ruchem drogowym. Materiały konferencji: Telematyka i bezpieczeństwo ruchu drogowego, Katowice 2004.

Recenzent: Dr hab. inż. Romuald Szopa

Praca wykonana w ramach BK-234/RT5/2004.