

**Jarosław RULKA, Jarosław TUROWSKI**  
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki,  
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
E-mail: [jaroslaw.rulka@wat.edu.pl](mailto:jaroslaw.rulka@wat.edu.pl)

## **Symulacyjny model ruchu drogowego jako moduł systemu zarządzania kryzysowego w aglomeracji**

### **1 Wstęp**

Sieć drogowa jako podsystem sieci transportowej jest jednym z głównych elementów infrastruktury krytycznej aglomeracji. Z uwagi na swój charakter i silne powiązania z innymi elementami funkcjonalnymi aglomeracji, sieć drogowa jest podsystemem bardzo wrażliwym i newralgicznym z punktu widzenia całości. Zmniejszenie wydolności systemu transportowego bardzo negatywnie wpływa na funkcjonowanie całej aglomeracji prowadząc, w przypadku dużej niewydolności, do zagrożenia wielu jej obiektów infrastruktury krytycznej i, w konsekwencji, powstania sytuacji kryzysowej.

Z definicji zator drogowy powstaje wtedy, kiedy liczba pojazdów, które chcą przejechać daną drogą jest większa od jej przepustowości. Stan taki może być spowodowany wieloma czynnikami, takimi jak zdarzenia nadzwyczajne (w tym m.in. wypadki drogowe, awarie pojazdów, ekstremalne zjawiska atmosferyczne), czy szczególne okresy w ciągu roku (święta, początek wakacji itp.) zwiększające natężenie ruchu. Korki mogą wywołać też źle ustawione światła lub brak ich synchronizacji.

Możliwość przewidzenia rozwoju i skutków powstawania zatorów drogowych w wyniku różnych zdarzeń losowych wydaje się zatem być cennym i niezbędnym elementem funkcjonalnym każdego systemu zarządzania kryzysowego aglomeracji.

Ze względu na szczegółowość odwzorowanej rzeczywistości modele symulacyjne ruchu drogowego (sieci drogowej) można podzielić, poczynając od najmniej szczegółowych, na makroskopowe, mezoskopowe oraz mikroskopowe. Modele makroskopowe opisują ruch pojazdów na niskim poziomie szczegółowości, przy wykorzystaniu modeli matematycznych ciągłych, które są często wzorowane na dynamice płynów (porównanie strumienia pojazdów do strumienia wody płynącej przez rurę). Modele mikroskopowe natomiast opisują pojazdy i interakcje zachodzące między nimi na wysokim poziomie szczegółowości. Każdy pojazd jest traktowany jako osobny element modelu, który wchodzi w interakcje z innymi elementami i modelowanym środowiskiem. Interakcje pomiędzy pojazdami przyjmują postać bądź modelu jazdy za liderem (ang. vehicle following model), bądź modelu zmiany pasa ruchu (ang. lane changing model), bądź ich pewnej kombinacji. Model mezoskopowy jest modelem pośrednim w stosunku do dwóch powyższych. Opisywane przez model interakcje pojazdów oraz otoczenie przedstawiane są w znacznie bardziej zagregowany sposób niż w modelu mikroskopowym.

Symulacja komunikacji samochodowej w aglomeracji jest jednym z najtrudniejszych i najbardziej skomplikowanych scenariuszy symulacyjnych ruchu drogowego.

W przeciwieństwie do modeli opisujących ruch po autostradach, strumień pojazdów w ruchu miejskim jest przerywany przez liczne skrzyżowania, sygnalizacje świetlne, ronda i inne elementy. Sieci komunikacyjne dużych miast są bardzo skomplikowane, składają się z dużej liczby połączeń drogowych i skrzyżowań różnych typów (z lub bez sygnalizacji świetlnej). Dla tego typu symulacji odpowiednie wydają się być jedynie modele mikroskopowe, które umożliwiają zamodelowanie pojedynczych pojazdów właściwie reagujących na napotkane na drogach sytuacje.

## 2 Model formalny symulatora ruchu drogowego

Opis ruchu drogowego dotyczy opisu stanu i zachowania pojedynczego pojazdu w ramach sieci drogowej aglomeracji w kontekście zachowania innych pojazdów w tej samej sieci oraz innych warunków drogowych (sygnalizatorów świetlnych).

Pojazdy są generowane w węzłach końcowych z ustaloną trasą (odcinek drogowy, numer pasa ruchu), zgodnie z którą poruszają się w sieci drogowej do drugiego węzła końcowego.

Model ruchu drogowego w aglomeracji obejmuje:

- model sieci drogowej aglomeracji:
  - model sieci połączeń drogowych,
  - model organizacji ruchu (pasy ruchu, kierunki jazdy, pierwszeństwo),
- model ruchu pojedynczego pojazdu:
  - model stanu,
  - funkcja przejścia do nowego stanu.

Model sieci połączeń drogowych

Sieć połączeń drogowych

$$SPD = \langle G, \{\xi_i\}, \{\eta_j\} \rangle \quad (1)$$

$G$  – graf opisujący strukturę połączeń drogowych (graf Berge'a bez pętli) (węzły - skrzyżowania, łuki – jednokierunkowe odcinki drogowe);

$\{\xi_i\}$  – zbiór funkcji na węzłach:

- numer węzła sieci drogowej
- stan przejezdności węzła drogowego

$\{\eta_j\}$  – zbiór funkcji na łukach:

- numer łuku sieci drogowej
- długość łuku sieci drogowej
- maksymalna dopuszczalna prędkość na łuku drogi
- stan przejezdności łuku drogi
- liczba pasów odcinka drogowego.

### **Model organizacji ruchu**

Organizacja ruchu opisywana jest przez trójkę uporządkowaną

$$OR = \langle G^*, R_{\text{pasy}}, SS \rangle \quad (2)$$

gdzie:

- $G^*$  - graf sprzężony opisujący dopuszczalne kierunki jazdy przez skrzyżowania;
- $R_{\text{pasy}}$  - relacja opisująca dopuszczalne połączenia pasów jazdy na skrzyżowaniu dla dopuszczalnego kierunku jazdy;
- $SS$  - funkcja opisująca dla danego skrzyżowania organizację sygnalizacji świetlnej – kolejność i czas trwania fazy świateł dla ustalonego kierunku jazdy.

### **Model stanu pojedynczego pojazdu w chwili $t$**

Pojazdy poruszają się w sieci drogowej pomiędzy węzłami końcowymi po ustalonych trasach składających się z odcinków trasy opisywanych przez łuk drogowy oraz numer pasa ruchu na tym łuku.

Stan pojedynczego pojazdu o numerze  $n$ -tym w sieci drogowej w chwili  $t$  opisywany jest przez następującą czwórkę uporządkowaną:

$$SP_n(t) = \langle x_n(t), v_n(t), rr_n(t), R_n \rangle \quad (3)$$

gdzie:

- $x_n(t)$  - odległość  $n$ -tego pojazdu w chwili  $t$  od początku pasa ruchu (odcinka drogowego);
- $v_n(t)$  - prędkość  $n$ -tego pojazdu w chwili  $t$ ;
- $rr_n(t)$  - odcinek trasy, po którym w chwili  $t$  porusza się  $n$ -ty pojazd;
- $R_n$  - trasa  $n$ -tego pojazdu.

### **Funkcja przejścia dla $n$ -tego pojazdu do nowego stanu w kolejnym kroku symulacji**

#### **Założenia i własności**

- a) Zachowanie pojazdu w sieci drogowej opisywane jest przez jego zmianę prędkości. Zmiana ta ma na celu dostosowanie prędkości pojazdu względem najbliższego przed nim obiektu, którym może być bądź pojazd poprzedzający, bądź węzeł sieci drogowej (skrzyżowanie drogi).
- b) Pojazdy w symulowanych lub prognozowanych (przy obliczeniach w danym kroku symulacji) odcinkach czasu poruszają się ruchem prostoliniowym jednostajnym lub jednostajnie przyspieszonym.
- c) Jeżeli na pasie ruchu danego odcinka drogi jest pojazd przed rozpatrywanym pojazdem, to pojazd dostosowuje swoją prędkość w zależności od odległości między nimi w następujący sposób:
  - gdy odległość między nimi jest większa od tzw. odległości dostosowującej, to pojazd stara się jechać w danym kroku symulacji z maksymalną dopuszczalną prędkością na tym pasie odcinka drogi;

- gdy odległość między nimi jest mniejsza od tzw. odległości dostosowującej oraz jednocześnie większa od tzw. odległości bezpieczeństwa, to pojazd stara się jechać w danym kroku symulacji z prędkością pojazdu poprzedzającego;
- d) Jeżeli na pasie ruchu danego odcinka drogi nie ma pojazdu przed rozpatrywanym pojazdem, to pojazd dostosowuje swoją prędkość w zależności od:
- stanu sygnalizacji świetlnej w danym kierunku wynikającym z marszruty;
  - odległości od skrzyżowania;
  - odległości od ostatniego pojazdu na wybranym pasie kolejnego odcinka marszruty;
- e) Długość kroku symulacji jest zmienna i nie większa od czasu, który powoduje w trakcie symulacji:
- przekroczenia odległości dostosowującej dla  $n$ -tego pojazdu;
  - przekroczenia odległości bezpiecznej dla  $n$ -tego pojazdu;
  - zmianę koloru świateł.

#### **Algorytm wyznaczania nowego stanu symulatora**

W pierwszym etapie wyznaczane są:

- przyspieszenie dla każdego pojazdu, z którym będzie się poruszał w kolejnym kroku symulacji;
- ograniczenie długości kroku symulacji dla każdego pojazdu z uwagi na aktualne i przewidywane warunki drogowe;
- maksymalna, dopuszczalna dla wszystkich pojazdów długość kroku symulacji.

W drugim etapie wyznaczane są dla ustalonej długości kroku symulacji nowe stany wszystkich pojazdów (prędkość i położenie) w następujących krokach:

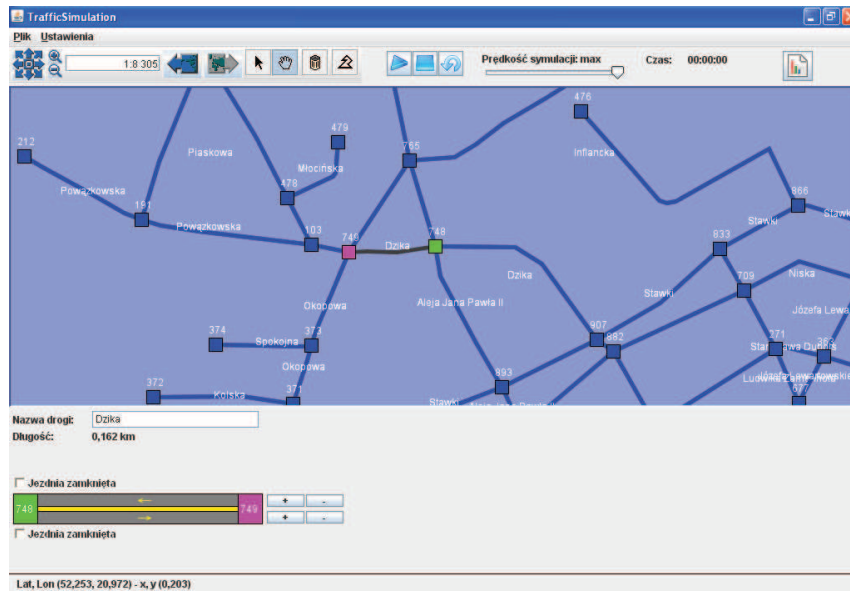
- wyznaczenie prędkości  $n$ -tego pojazdu w kolejnym kroku symulacyjnym;
- wyznaczenie średniej prędkości poruszania się  $n$ -tego pojazdu podczas kroku symulacji;
- wyznaczenie przebytej w kolejnym kroku symulacji drogi  $n$ -tego pojazdu;
- określenie numeru odcinka trasy, na którym aktualnie będzie się znajdował pojazd.

### **3 Prezentacja aplikacji**

Głównym przeznaczeniem stworzonej aplikacji jest symulacja ruchu drogowego w aglomeracji miejskiej podczas wystąpienia tzw. sytuacji kryzysowej. Do sytuacji takich należy zablokowanie ruchu na jezdni, skrzyżowaniu i/lub obszarze obejmującym wiele dróg i skrzyżowań spowodowane np. wypadkiem drogowym lub remontem.

Projekt aplikacji został oparty na środowisku OpenMap [7]. Jest to darmowa biblioteka wspomagająca tworzenie aplikacji do graficznego zobrazowania wszelkiego rodzaju danych geograficznych. Aplikacja została zaimplementowana w języku Java.

*Symulacyjny model ruchu drogowego  
jako moduł systemu zarządzania kryzysowego w aglomeracji*



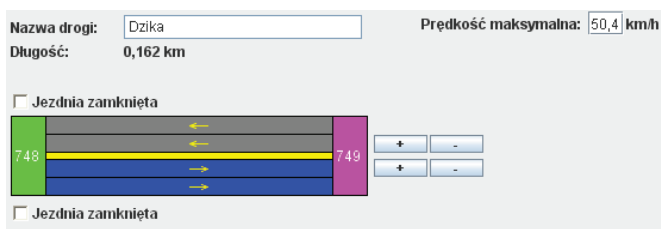
Rys. 1. Główne okno aplikacji symulatora

Fig. 1. Application main window

Praca z aplikacją rozpoczyna się od przygotowania struktury sieci drogowej. Proces jej opracowania może przebiegać na dwa sposoby. Użytkownik może stworzyć dowolną sieć drogową używając narzędzi do rysowania i edycji dróg oraz skrzyżowań. Możliwe jest także wczytanie mapy drogowej z formatu OpenStreetMap [8].

OpenStreetMap jest projektem, którego głównym założeniem jest tworzenie ogólnodostępnych danych geograficznych. Dane te są przechowywane w specjalnie zdefiniowanym formacie i można je pobrać ze strony projektu w postaci pliku XML. Format ten nie udostępnia jednak szczegółowych informacji o skrzyżowaniach. Ograniczenie to wymusiło konieczność zastosowania pewnych założeń dotyczących wczytywania struktury sieci drogowej, które mogą powodować, że niektóre jej elementy będą odbiegać od rzeczywistości. Dlatego też, po wczytaniu mapy konieczna jest ręczna edycja takich miejsc, przy użyciu narzędzi udostępnianych przez aplikację.

Zaznaczenie drogi powoduje wyświetlenie panelu służącego do jej edycji (Rys. 2). Dla każdej drogi możliwe jest ustawienie liczby pasów ruchu w każdym kierunku, a także wskazanie czy dana jezdnia (kierunek jazdy) jest zamknięta. Jej zamknięcie imituje zaistnienie sytuacji kryzysowej. Dla każdego kierunku jazdy możliwe jest również określenie maksymalnej dopuszczalnej prędkości poruszania się pojazdów po danej jezdni.



Rys. 2. Panel edycyjny odcinka drogowego

Fig. 2. Panel for road section editing

Podobnie jak dla drogi, dostępny jest panel służący do edycji każdego skrzyżowania (Rys. 3). W panelu tym możliwe jest ustawienie organizacji ruchu na danym skrzyżowaniu, tzn. kierunków w jakich może odbywać się jazda przez dane skrzyżowanie. Kierunki te reprezentowane są przez linie łączące pasy ruchu. Możliwe jest także ustawienie parametrów sygnalizacji świetlnej na danym skrzyżowaniu. Skrzyżowanie podobnie jak droga może zostać zamknięte, co powoduje jego wyłączenie z ruchu pojazdów.



Rys. 3. Panel edycyjny odcinka drogowego

Fig. 3. Panel for road intersection editing

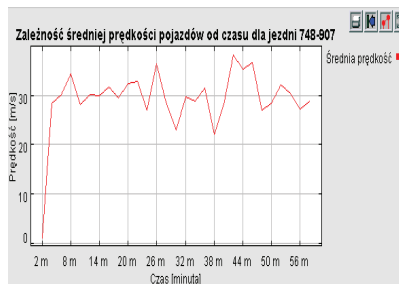
Po przygotowaniu struktury sieci drogowej oraz ustawieniu parametrów skrzyżowań generujących można uruchomić symulację. W trakcie jej trwania gromadzone są dane statystyczne dotyczące ruchu pojazdów na poszczególnych drogach. Dostępne są one po zaznaczeniu danej drogi (Rys. 4).

Prędkość maksymalna:	50,4 km/h	Jezdnia 748-749	
<b>Wartości aktualne</b>		<b>Wartości z całej symulacji</b>	
Liczba pojazdów na jezdni:	15	Średnia prędkość pojazdów:	13 km/h
Średnia prędkość pojazdów:	0 km/h	Średnia liczba pojazdów w kolejce:	3,5
<b>Wartości z ostatnich 2 minut</b>		Maksymalna liczba pojazdów w kolejce:	15
Średnia prędkość pojazdów:	12,2 km/h	Natężenie:	408 poj/h
Średnia liczba pojazdów w kolejce:	6,4	Przejechało:	408
Maksymalna liczba pojazdów w kolejce:	15	Wykres prędkości	
Przejechało:	19	Wykres kolejek	

Rys. 4. Chwilowe charakterystyki wybranego odcinka drogi

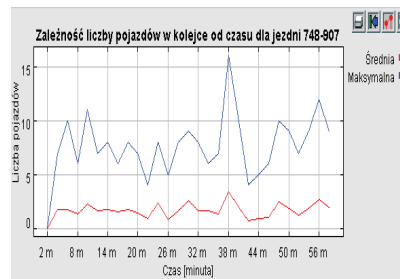
Fig. 4. On-line characteristics of selected Road section

Dla każdej jezdni wyznaczone są miary efektywności reprezentowane przez wartości aktualne, wartości uśrednione, obliczone na podstawie ustalonej liczby ostatnich pomiarów, oraz wartości obliczone dla całego czasu trwania symulacji. Generowane są następujące dane statystyczne: liczba pojazdów na jezdni, średnia prędkość pojazdów, średnia oraz maksymalna liczba pojazdów stojących w kolejce (oczekujących na wjazd na skrzyżowanie), natężenie pojazdów, liczba pojazdów która przejechała przez daną jezdnię.



Rys. 5. Średnia prędkość pojazdu w funkcji czasu

Fig. 5. Average vehicle speed dependency on time



Rys. 6. Średnia i maks. liczba pojazdów na odcinku drogi w funkcji czasu

Fig. 6. Average and max. vehicle number on the road section depends on time

Dla każdej jezdni dostępne są dwa wykresy. Pierwszy przedstawia zależność średniej prędkości pojazdów od czasu (Rys. 5), zaś drugi zależność średniej i maksymalnej liczby pojazdów stojących w kolejce na danej jezdni (Rys. 6).

W trakcie trwania symulacji kolor dróg zmienia się w zależności od średniej prędkości poruszających się po nich pojazdów. Pozwala to na łatwe zlokalizowanie miejsc, w których tworzą się korki. Użytkownik może w każdej chwili zamykać i otwierać elementy sieci drogowej i obserwować, jaki będzie miało to wpływ na zachowanie ruchu pojazdów w badanym obszarze. Powtarzając eksperymenty dla różnych wartości parametrów sieci drogowej można ocenić, które z nich dają lepsze efekty, na przykład ze względu na średnią prędkość poruszania się po drogach. Dzięki wykonaniu odpowiednich pomiarów, w przypadku zaistnienia sytuacji kryzysowej, możliwe będzie ustawienie takiej organizacji ruchu, która w danym momencie będzie optymalna.

#### 4 Podsumowanie

Przedstawiony model symulacyjny wraz z aplikacją jest wynikiem prac prowadzonych na Wydziale Cybernetyki WAT w ramach projektu MNiSW PBZ-MIN/011/013/2004 pt.: „Modele zagrożeń aglomeracji miejskiej wraz z systemem zarządzania kryzysowego na przykładzie m.st. Warszawy”.

Do głównych cech symulatora należy zaliczyć:

- możliwość interakcji w czasie symulacji (zamykanie/otwieranie skrzyżowań i odcinków drogowych, informowanie lub jego brak kierowców o zmianie);

- bardzo szczegółowy model sieci drogowej;
- możliwość importu danych z formatu OpenStreetMap;
- graficzny edytor sieci drogowej.

Potencjalnymi obszarami zastosowań opisywanego narzędzia mogą być np.: prognozowanie rozwoju i skutków zagrożenia dla sieci drogowej aglomeracji, wspomaganie organizacji ruchu, czy wspomaganie planowania tras przejazdu w warunkach wystąpienia zagrożenia.

Rozwój aplikacji może dotyczyć m.in.: możliwości definiowania pojazdów różnych typów, modelowania zmiany pasa ruchu, modelowania ruchu okrężnego, czy modelowania innych zachowań kierowców.

### Literatura

1. *Traffic Flow Theory. A State-of-the-Art report*. Revised 2001. Organized by the Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (AHB45)
2. Schulze T., Fliess T.: *Urban traffic simulation with psycho-physical vehicle-following models*, ACM Press, 1997. strony 1222-1229. Proceedings of the 29th conference on Winter simulation
3. Chang G., Junchaya T.: *Simulating network traffic flows with a massively parallel computing architecture*, ACM Press, 1993. strony 762-770. WSC '93: Proceedings of the 25th conference on Winter simulation
4. Turowski J.: *Symulacyjne metody wspomaganie organizacji komunikacji samochodowej w aglomeracji podczas wystąpienia sytuacji kryzysowej*, Praca magisterska napisana pod kierunkiem J. Rulki, Wydział Cybernetyki, WAT, Warszawa 2009
5. Dowling Associates, Inc., *Definition, Interpretation, And Calculation Of Traffic Analysis Tools Measures of Effectiveness*, Final Report, 2006
6. Lemessi M.: *An SLX-based microsimulation model for a two-lane road section*: IEEE Computer Society, 2001. strony 1064-1071. WSC '01: Proceedings of the 33rd conference on Winter simulation
7. <http://openmap.bbn.com> (20.03.2009)
8. <http://www.openstreetmap.org> (20.03.2009)

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki prac realizowanych w ramach projektu MNiSW PBZ-MIN/011/013/2004 pt.: „Modele zagrożeń aglomeracji miejskiej wraz z systemem zarządzania kryzysowego na przykładzie m.st. Warszawy”.

Praca dotyczy komputerowego narzędzia, które służy do symulacji ruchu drogowego w wybranym obszarze aglomeracji. Referat został podzielony na dwie zasadnicze części. W pierwszej z nich opisano główne elementy modelu matematycznego symulatora ruchu. W drugiej scharakteryzowano powstałą na jego bazie aplikację symulatora.



## **A simulation traffic model as a module of crisis management system for agglomeration**

### Summary

The paper deals with results of works which have been supported by project number PBZ-MIN/011/013/2004 titled: „Models of risks of urban agglomeration with a crisis management system on the example of the city of Warsaw”.

The article describes computer tool for traffic simulation in the selected agglomeration area. After some introduction into an agglomeration traffic problem we consider the mathematical model and the application based on it.