

Michał MACIEJEWSKI¹
Marek MACIEJEWSKI¹

ZASTOSOWANIE AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH DO SYMULACJI RUCHU DROGOWEGO W MIEŚCIE

W artykule przedstawiono problemy zastosowania automatów komórkowych do przeprowadzania mikroskopowego modelowania i symulacji przepływu ruchu drogowego dla rzeczywistego fragmentu sieci. W pierwszej kolejności nakreślono problematykę modelowania i symulacji ruchu oraz przedstawiono system TRANSIMS. W dalszej części opisano przebieg prac nad modelem, a następnie wyniki symulacji wraz z omówieniem procesu kalibracji modelu. Następnie autorzy dokonali krótkiej analizy wyników i odnieśli je do stanu rzeczywistego oraz rezultatów otrzymanych przy zastosowaniu systemu SUMO. Artykuł kończy podsumowanie zrealizowanych prac.

APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA TO SIMULATION OF URBAN TRAFFIC

The paper concerns an application of cellular automata to microscopic modeling and simulation of urban traffic flow on a fragment of a real road network. First, the problem of traffic flow modeling and simulation, and TRANSIMS system were introduced. Afterwards, a process of model construction and simulation results were presented. The authors discussed the issue of model calibration, and then conducted a results analysis, with a reference to the real state, and with a comparison to the outcome obtained by means of SUMO system. The paper ends with a summary of the conducted research.

1. MODELOWANIE I SYMULACJA

Wiarygodne opisanie ruchu drogowego nie jest zadaniem trywialnym. Dotychczas opracowano wiele modeli opisujących ruch potoku pojazdów, niestety żadnego z nich nie można określić mianem idealnego bądź uniwersalnego. W ogólności można wyróżnić cztery podstawowe klasy modeli ruchu drogowego [1]:

- makroskopowe [2],

¹Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych,
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3, Tel. +48 61 665 2775, -2226, -2709, Fax. +48 61 665 2736
Email: {michal.maciejewski, marek.maciejewski}@put.poznan.pl

- mezoskopowe,
- mikroskopowe [3],
- submikroskopowe.

Modele makroskopowe znajdują zastosowanie tam, gdzie nie jest wymagana szczegółowa informacja o zachowaniu poszczególnych pojazdów, lecz wyłącznie ogólna ocena jakościowa ruchu na większej i bardziej złożonej konfiguracji sieci drogowej, a więc w planowaniu regionalnym. Z kolei modele mikroskopowe umożliwiają otrzymanie szacunkowych wprawdzie, ale przy tym całkiem wiarygodnych informacji o zachowaniu pojedynczych pojazdów. Z tego powodu można je stosować głównie w odniesieniu do mniejszych zakresowo układów komunikacyjnych, ale o większym poziomie szczegółowości.

2. SYSTEM TRANSIMS

Do badań symulacyjnych z wykorzystaniem automatów komórkowych wykorzystano system TRANSIMS (TRansportation ANalysis SIMulation System) [4]. Jest on darmowym zintegrowanym systemem symulacyjnym wspomagającym przeprowadzanie analiz regionalnych systemów transportowych. System ma architekturę wielomodułową i w jego skład wchodzi następujące moduły:

- syntezytor populacji (*Population Synthesizer*) – celem modułu jest stworzenie populacji mieszkańców danego regionu m.in. na podstawie szczegółowych danych statystycznych,
- generator czynności (*Activity Generator*) – służy generacji planów dziennych dla każdego syntetycznego osobnika; przykładowe czynności to praca, zakupy, szkoła itp.,
- planista marszrut (*Route Planner*) – dokonuje wyboru środków transportu oraz wyznacza marszruty dla każdego osobnika na podstawie dziennych planów zajęć,
- mikrosymulator ruchu drogowego (*Traffic Microsimulator*) – przeprowadza symulację poszczególnych marszrut wybranych dla każdego z syntetycznych osobników,
- estymator emisji zanieczyszczeń (*Emissions Estimator*) – umożliwia oszacowanie danych dotyczących wielkości emisji zanieczyszczeń motoryzacyjnych na potrzeby analizy jakości powietrza,
- sterownik sprzężenia zwrotnego (*Feedback Controller*) – zarządza przepływem informacji pomiędzy pozostałymi modułami; steruje procesem iteracyjnego przeprowadzania generacji czynności, marszrutyzacji i mikrosymulacji w pętli sprzężenia zwrotnego (celem jest uzyskanie stanu stabilnego zgodnie z pierwszą zasadą Wardropa [5]).

Moduł symulacji ruchu, będący narzędziem przeprowadzonych badań, jest oparty na teorii automatów komórkowych i wykorzystuje powszechnie uznany model Nagela-Schreckenberga [6]. W rozszerzonej wersji model ten obejmuje modele jazdy za liderem, zmiany pasa ruchu itp. Podstawową cechą tego typu modeli jest dyskretyzacja czasu jak i przestrzeni. W tym przypadku każdy odcinek drogi podzielony jest na odcinki równej długości (w TRANSIMS domyślną wielkością jest 7,5 m). Każda komórka może być w jednym z dwóch stanów: zajęta (przez jakiś samochód) lub wolna. Dyskretyzacja

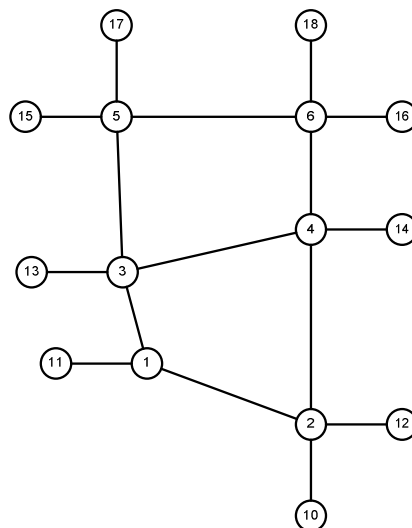
przestrzeni wpływa na dyskretyzację parametrów pojazdów (np. długość) oraz zmiennych opisujących pojazdy (np. pozycja, prędkość, przyspieszenie). W efekcie, przyjmując długość komórki jako 7,5 m, w wyniku dyskretyzacji wspomniane parametry i zmienne przyjmują wartości będące wielokrotnościami liczby 7,5 lub ewentualnie wartości zerowe. Mimo istotnych uproszczeń modele automatów komórkowych pozwalają wydobyć pierwszego i drugiego rzędu efekty makroskopowego opisu przepływu ruchu i są w tym względzie bardzo elastyczne oraz silne obliczeniowo. Dzięki dużej szybkości działania możliwe było zastosowanie systemu TRANSIMS dla dużych obszarów, a nawet państw [7]. Badania zrealizowano w systemie TRANSIMS w wersji 4.0.6.01 (wersja modułu mikrosymulatora to 4.0.75).

3. SIEĆ DROGOWA

Na potrzeby badań wybrano fragment miejskiej sieci drogowej w dzielnicy Grunwald, w południowo-zachodniej części Poznania, składający się z następujących ulic (rys.1):

- Krzysztofa Arciszewskiego,
- Głogowska,
- Hetmańska,
- Macieja Palacza,
- Piotra Ściegiennego.

Wymienione ulice charakteryzują się wysokim natężeniem ruchu drogowego i krzyżując się wyznaczają 6 skrzyżowań, na których ruch drogowy sterowany jest sygnalizacją świetlną.



Rys.1. Fragment sieci drogowej Poznania [8] oraz schemat modelu

4. MODEL W SYSTEMIE TRANSIMS

4.1 Sieć drogowa

Ze względu na niewielkie znaczenie, w rozumieniu wielkości potoku pojazdów, w budowanym modelu pominięto mniejsze ulice wchodzące w skład rozpatrywanego fragmentu sieci. W ich okolicy brakuje obiektów generujących duży ruch, takich jak centra handlowe, urzędy, obiekty sportowe, kina itp., natomiast dominuje zabudowa mieszkalna. Istotnym jest również fakt, że ze względu na ograniczenie systemu TRANSIMS, nie uwzględniono linii tramwajowych biegnących wzdłuż ulic Hetmańska i Głogowska.

Na rys.1 przedstawiono schemat modelowanego układu drogowego wraz z oznaczeniami skrzyżowań. Odcinki prowadzące od węzła 10 do 18 odpowiadają przebiegowi ul. Głogowskiej. Węzły 1,...,6 to skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, natomiast 10,...,18 – to węzły graniczne, które są miejscami początku i końca marszrut pojazdów. Węzły 1-6 są połączone odcinkami o długości równej rzeczywistej długości odcinków ulic, natomiast odcinki prowadzące do i od węzłów granicznych mają długość 300 m.

4.2 Sygnalizacja świetlna

Szczegółowe informacje o sygnalizacji świetlnej zaczerpnięto z pracy [9], w ramach której przeprowadzono szczegółową identyfikację programów sygnalizacji. W przypadku niektórych skrzyżowań program sygnalizacji charakteryzował się priorytetem dla tramwajów. Z uwagi na pominięcie w modelu komunikacji tramwajowej, pomiary przeprowadzono w okresach, w których tramwaje nie czekały na przejazd przez skrzyżowanie.

W przypadku wszystkich skrzyżowań po zakończeniu wyświetlania sygnału zielonego następował 3 sekundy okres z sygnałem żółtym. Z uwagi na ograniczenia systemu TRANSIMS nie jest możliwe zamodelowanie jednosekundowego sygnału czerwono-żółtego w przypadku przejścia z sygnału czerwonego na zielony. W takiej sytuacji wydłużano czas trwania sygnału czerwonego lub ewentualnie zielonego.

4.3 Pomiary ruchu drogowego

W celu oszacowania wielkości i rozkładu ruchu drogowego dokonano pomiarów natężenia ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną (węzły 1-6). Pomiary wykonano (w ramach realizacji pracy [9]) ręcznie na drogach dolotowych do skrzyżowań z rozróżnieniem na typy pojazdów:

- osobowe (O),
- dostawcze (D),
- ciężarowe (C),
- ciężarowe z przyczepą (Cp),
- autobusy (A),
- motocykle (M),
- rowery (R),

oraz typy manewrów:

- skręt w lewo (L),
- jazda na wprost (W),

- skręt w prawo (P).

Badania natężenia wykonano w dzień roboczy (21 kwietnia 2009) w godzinach szczytu komunikacyjnego (między godziną 14:00 a 18:00). Warunki do jazdy były bardzo dobre – sucha nawierzchnia, temperatura ok. 20°C, lekko zachmurzone niebo i bardzo dobra widoczność. Na każde skrzyżowanie poświęcono 30 minut. W tym czasie zliczono liczbę pojazdów dla około dziesięciu pełnych cykli sygnalizacji, a następnie znormalizowano wyniki, aby otrzymać liczbę pojazdów na godzinę.

Z uwagi na przeprowadzenie badań w godzinach szczytu na skrzyżowaniach o dużym natężeniu ruchu, otrzymane wyniki odpowiadają w przybliżeniu przepustowości badanych skrzyżowań.

4.4 Generacja ruchu drogowego

W oparciu o zebrane wyniki przystąpiono do generacji populacji pojazdów wraz z marszrutami. Marszruty powinny być tak zaplanowane, aby były maksymalnie zgodne z rzeczywistymi trasami przejazdu pojazdów. Z uwagi na specyfikę systemu TRANSIMS budowa marszrut jest realizowana przez moduł *Route Planner* (planista marszrut) na podstawie danych o populacji syntetycznych osobników oraz wygenerowanych planach dziennych zajęć. Jednak w przypadku realizowanych badań, które dotyczyły tylko zastosowania modułu mikrosymulacji, konieczne było wykorzystanie danych pomiarowych natężenia ruchu na skrzyżowaniach. W tym celu stworzono aplikację, która działa w sposób analogiczny do programu JTRROUTER będącego elementem składowym systemu symulacji ruchu SUMO [10]. Stworzona aplikacja na wejściu wymaga następujących danych:

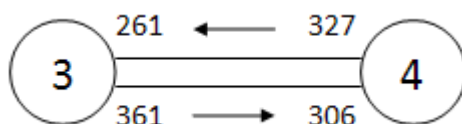
- rozkład typów wykonywanych manewrów na wlotach skrzyżowań (*junction turning ratios*), tj. prawdopodobieństwo wybrania poszczególnych odcinków wylotowych dla danego odcinka wlotowego,
- wielkość natężenia potoku pojazdów z podziałem na poszczególne typy pojazdów (*flows*); dane o natężeniu są specyfikowane dla każdego odcinka wlotowego sieci,
- lista parkingów ulokowanych przy wlotach/wylotach sieci stanowiących albo źródło pojazdów (*in-parking*) albo ich ujście (*out-parking*); w TRANSIMS każdy pojazd zaczyna i kończy trasę na parkingu,
- przedział czasu (*startTime*, *stopTime*), dla którego mają być wygenerowane marszruty.

Z uwagi, że stworzona aplikacja w aktualnej wersji (podobnie jak JTRRouter) nie umożliwia oddzielnego definiowania rozkładów typu manewrów dla poszczególnych typów pojazdów, wyznaczono rozkłady w przeliczeniu na pojazdy umowne. Zestawienia wykonywane w pojazdach umownych pozwalają uwzględnić różny stopień oddziaływania poszczególnych pojazdów na strumień ruchu w zależności od typu pojazdu. W badaniach wykorzystano typowe współczynniki przeliczeniowe stosowane w Polsce dla skrzyżowań z sygnalizacją zamieszczoną w [11].

Zarówno źródłami jak i ujściami potoków pojazdów są węzły graniczne sieci (10-18). Przyjęto, że natężenie potoku pojazdów na poszczególnych odcinkach wlotowych sieci jest identyczne z natężeniem na odpowiadających tym odcinkom wlotach skrzyżowań. Wielkości natężenia ruchu wprowadzono do TRANSIMS uwzględniając podział na typy pojazdów. Z uwagi na brak wsparcia dla pojazdów jednośladowych, pominięto motocykle oraz rowery.

Należy zauważyć, że zebrane wyniki opisujące natężenie ruchu na skrzyżowaniach nie są spójne. Dla danego odcinka prowadzącego od skrzyżowania do skrzyżowania znane jest natężenie na wlocie z pierwszego oraz na wlocie do drugiego skrzyżowania. Zazwyczaj obie wartości natężeń nie są sobie równe. Wynika to z faktu niemożności przeprowadzenia ręcznych pomiarów równocześnie na wszystkich skrzyżowaniach, oraz z nieuwzględnienia w badaniach dróg osiedlowych czy możliwości postoju lub zatrzymania pojazdu pomiędzy skrzyżowaniami.

Największa różnica w pomiarach natężeń wystąpiła w przypadku ulicy Palacza pomiędzy węzłami 3 i 4, co zostało zobrazowane na rys.2. Co interesujące, niezależnie od kierunku jazdy więcej pojazdów wjeżdżało na ul. Palacza niż z niej wyjeżdżało. Głównym powodem tego jest istnienie osiedli mieszkaniowych, do których prowadzą drogi osiedlowe wychodzące z ul. Palacza. Badania natężenia ruchu były wykonywane w godzinach popołudniowego szczytu, a więc wtedy, gdy większość osób kieruje się do domu. Tym samym więcej osób wjeżdżało w ul. Palacza i osiedlowe drogi, aniżeli wyjeżdżało z nich, co znalazło swoje odzwierciedlenie w wynikach.



Rys.2. Natężenie ruchu – ul. Palacza (odcinek 3↔4) [9]

Należy stwierdzić, że drobne niezgodności w pomiarach natężeń nie stanowią istotnego problemu. Stosowana metoda generacji ruchu nie korzysta bezpośrednio z wielkości natężeń, lecz z prawdopodobieństwa wykonania poszczególnych manewrów. Wielkości natężeń są wykorzystywane bezpośrednio tylko przy opisie natężenia ruchu na wlotach sieci.

5. SYMULACJA W SYSTEMIE TRANSIMS

5.1 Wizualizacja symulacji

System TRANSIMS w wersji aktualnie dostępnej nie umożliwia wizualizacji przebiegu symulacji. Jednak w tym celu posiada pewne aplikacje umożliwiające generację map GIS będących migawkami sytuacji dla poszczególnych chwil czasu. Autorzy ponadto korzystali z darmowej aplikacji NEXTA [12], która posiada podstawowe możliwości wizualizacji przebiegu symulacji. Niemniej należy zaznaczyć, że brak profesjonalnej wizualizacji w TRANSIMS jest istotnym utrudnieniem. Aktualnie organizacje badawcze w USA zaangażowane w rozwój systemu (m.in. Argonne National Laboratory) pracują nad narzędziami wizualizacyjnymi.

5.2 Kalibracja modelu

W celu otrzymania wiarygodnych wyników badań symulacyjnych niezwykle istotnym jest przeprowadzenie kalibracji modelu poprzez identyfikację wartości jego parametrów. Wstępne wartości parametrów dla poszczególnych typów pojazdów ustalono w sposób

arbitralny. Następnie dokonano ich starannej kalibracji na podstawie wielokrotnego przeprowadzania badań symulacyjnych. Jako że danymi wejściowymi są natężenia potoków pojazdów przejeżdżających przez skrzyżowania, podstawowym kryterium kalibracji było otrzymanie symulacji o stabilnym przebiegu, a więc takiej, dla której nie wydłużały się kolejki pojazdów przed skrzyżowaniami wraz z upływem czasu. W tym celu obok oceny wizualnej sytuacji na drodze posługiwano się także wykresami liczby pojazdów w sieci. Ostateczne wartości parametrów przedstawione zostały w tab.1.

Tab.1. Parametry pojazdów po kalibracji

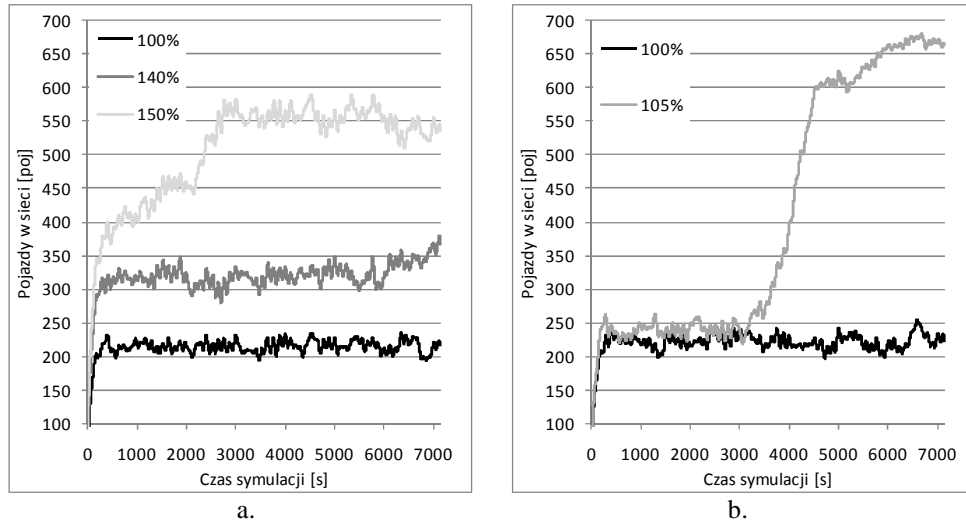
	długość [m]	prędkość maksymalna [m/s]	przyspieszenie maksymalne [m/s ²]	opóźnienie maksymalne [m/s ²]
O	7,5	37,5	7,5	7,5
D	15,0	37,5	7,5	7,5
C	22,5	30,0	7,5	7,5
Cp	30,0	22,5	7,5	7,5
A	15,0	22,5	7,5	7,5

Z uwagi na dyskretyzację drogi z dokładnością 7,5 m nie jest możliwe wprowadzenie precyzyjnych parametrów pojazdów. W przypadku długości (rozumianej jako długość obszaru zajmowanego przez pojazd) i prędkości wartości parametrów nie budzą wątpliwości. Natomiast w przypadku maksymalnych przyspieszeń i opóźnień wartości są znacząco przeszacowane, jednak z uwagi na długość komórki wynoszącą 7,5 m wartości 7,5 m/s² są najmniejszymi możliwymi do zastosowania.

Dla tak ustalonych parametrów pojazdów przeprowadzono szereg symulacji dla zmierzonego natężenia ruchu oraz przy stopniowo zwiększonym natężeniu ruchu. Otrzymane rezultaty dla wybranych wielkości natężeń przedstawiono na rys.3 (wykres po lewej stronie). Zarówno w przypadku natężenia wyjściowego (100%) jaki i zwiększonego o 40% (140%) nie tworzyły się znaczące kolejki pojazdów przed skrzyżowaniami i pojazdy dość płynnie przemierzały wyznaczone marszruty. Dopiero zwiększenie natężenia potoku pojazdów na wlotach do 150% spowodowało powstanie rosnących w czasie kolejek przed skrzyżowaniami.

Otrzymane wyniki są zaskakujące, ponieważ można było spodziewać się utrudnień w ruchu już przy wielkościach rzędu 110-120%. Wskazywały na to również wyniki badań symulacyjnych zrealizowanych przez autorów przy wykorzystaniu systemu SUMO [13]. Jedną z możliwych przyczyn wysokiej przepustowości skrzyżowań były zawyżone parametry przyspieszeń i opóźnień pojazdów (tab.1).

W związku z powyższym postanowiono powtórzyć eksperymenty obliczeniowe dla mniejszego rozmiaru komórek tak, aby możliwe było bardziej precyzyjne wyspecyfikowanie wartości parametrów. W ramach kolejnych eksperymentów przyjęto wielkość komórki 3,75 m, co dało dwukrotny wzrost precyzji w definiowaniu parametrów. Na rys.3 (prawy wykres) przedstawiono wyniki dla komórki wielkości 3,75 m. Okazuje się, że rezultaty otrzymane przy obu wielkościach komórek nie różniły się istotnie przy natężeniu 100% i niższym. Natomiast przy wyższych natężeniach dla wariantu z komórkami o mniejszych rozmiarach pojawiały się znaczące utrudnienia w ruchu już od 105% zmierzonego natężenia, co było bardziej zgodne z wynikami uzyskanymi w SUMO.



Rys.3. Wpływ wielkości natężenia ruchu na stopień kongestii (a – komórka 7,5m, b – komórka 3,75m)

Badania symulacyjne powtórzone jeszcze dla wielkości komórki 1,5 m, a więc 5 razy mniejszej od oryginalnej. W tym wariancie do natężenia ok. 60% otrzymywano wyniki zgodne z pozostałymi wariantami, natomiast od 65-70% - pojawiały się poważne problemy z przepustowością skrzyżowań.

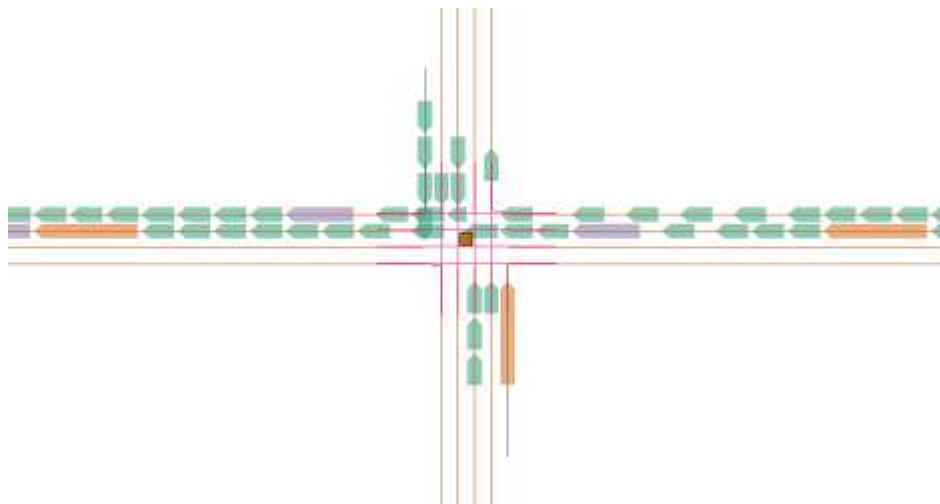
Odnosząc powyższe wyniki do wyników otrzymanych w SUMO należy zauważyć, że model w TRANSIMS umożliwił sprawniejszy przepływ ruchu. W rezultacie czego niższa była liczba pojazdów znajdujących się jednocześnie w sieci drogowej (ok. 200-250) w stosunku do modelu w SUMO (ok. 250-300).

5.3 Analiza wyników

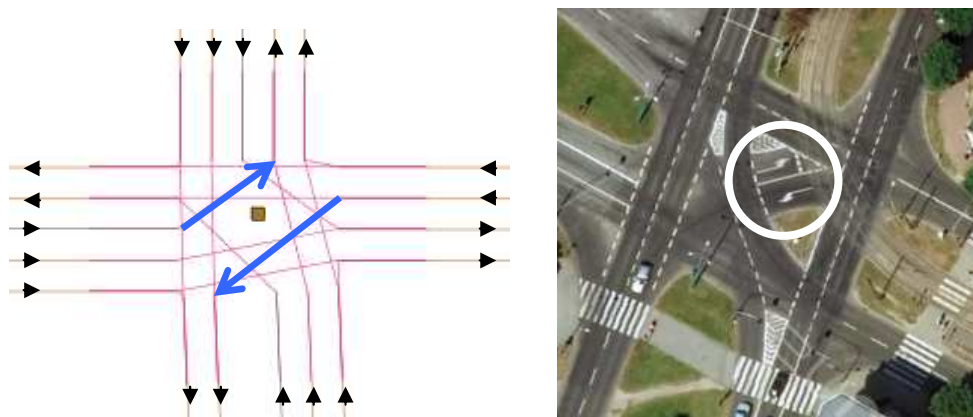
Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że skrzyżowanie nr 5 było krytyczne z punktu widzenia pojawienia się kolejek i wzrostu liczby pojazdów w sieci w przypadku odpowiednio wysokich natężeń (w zależności od wariantu wielkości komórki). Kongestia powstawała na wlocie od strony węzła 6, co było spowodowane niedostateczną przepustowością dla skrętu w lewo (z odcinka 6→5 na 5→3). Pojazdy skręcające w lewo blokowały wjazd na skrzyżowanie tym jadący prosto, a w efekcie przyblokowaniu ulegały również pojazdy skręcające w prawo z krawędzi 6→5 na 5→17. W skrajnym przypadku powstawał efekt domina („gridlock”), gdyż w wyniku zablokowania całego odcinka 6→5 narastała kolejka pojazdów przed skrzyżowaniem nr 6 (rys.4).

Podobny efekt zauważono także dla modelu zrealizowanego w systemie SUMO. Przymuszczalnie powodem relatywnie częstego powstawania kongestii na tym skrzyżowaniu w stosunku do pozostałych skrzyżowań jest brak możliwości dokładnego zamodelowania jego geometrii. Na rys.5 przedstawiono rzeczywiste skrzyżowanie oraz jego odpowiednik w modelu w TRANSIMS. Można zauważyć, że w przypadku obu

problematycznych manewrów skrętu w lewo w faktyczne istnieje możliwość wykonania ich dwuetapowo, niekoniecznie w ramach pojedynczego cyklu sygnalizacji świetlnej. Niestety w TRANSIMS, podobnie jak w SUMO, nie ma możliwości wiernego zamodelowania takiej geometrii skrzyżowania, co jest możliwe przykładowo w systemie Vissim firmy PTV [14].



Rys.4. Efekt domina („gridlock”) – skrzyżowanie nr 6



Rys.5. Rzeczywiste skrzyżowanie nr 5 [15] i jego model

3. WNIOSKI

Przedstawione badania pozytywnie weryfikują możliwości systemu TRANSIMS w zakresie jego zastosowania do symulowania rzeczywistego ruchu drogowego dla rozległej sieci. Wyniki dla komórek standardowej wielkości (7,5 m) oraz komórek dwukrotnie mniejszych (3,75 m) dają podobne i zgodne z oczekiwaniami wyniki. Jednak dla drugiego wariantu udało się otrzymać efekt pojawiania się kongestii wraz ze wzrostem natężenia. Wpływ wielkości komórki oraz innych parametrów na przebieg symulacji wymaga dalszych analiz.

Odnosząc powyższe wyniki do wyników otrzymanych w SUMO należy zauważyć, że model w TRANSIMS umożliwiał sprawniejszy przepływ ruchu. W rezultacie czego niższa była liczba pojazdów znajdujących się jednocześnie w sieci drogowej (ok. 200-250) w stosunku do modelu w SUMO (ok. 250-300). Autorzy planują przeprowadzenie symulacji dla badanego fragmentu sieci drogowej również z wykorzystaniem systemu Vissim.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Maerivoet S., De Moor B.: *Transportation Planning and Traffic Flow Models*. Internal Report 05-155, ESAT-SCD (SISTA), K.U.Leuven (Leuven, Belgium), 2005.
- [2] Maciejewski M., Walerjańczyk W.: *Przegląd i porównanie makroskopowych modeli przepływu ruchu*. Prace Naukowe – Transport z.62 (2007): Bezpieczeństwo, Sterowanie Ruchem, Telematyka w Transporcie, OWPW, s.191-200.
- [3] Maciejewski M., Maciejewski M.: *Przegląd i porównanie mikroskopowych modeli przepływu ruchu*. W: XI Międzynarodowa Konferencja Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu "TransComp - 2007". Zakopane, Poland, 2007, s. 15-20.
- [4] <http://www.transims-opensource.net/>
- [5] Wardrop J. G., *Some theoretical aspects of Road traffic research*, W: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 1 of 2, 1952.
- [6] Nagel K., Schreckenberg M.: *A cellular automaton model for freeway traffic*, J. Phys. I France 2 2221–2229 (1992).
- [7] Raney B., Voellmy A., Cetin N., Vrtic M., Nagel K.: *Towards a Microscopic Traffic Simulation of All of Switzerland*, Computational Science — ICCS, 371-380 (2002).
- [8] <http://maps.google.pl/>
- [9] Durczak T., Jezierki J., Kusiak Ł.: *Modelowanie i symulacja przepływu ruchu drogowego – porównanie wybranych systemów symulacji mikroskopowej*. Praca inżynierska, Politechnika Poznańska, 2010.
- [10] <http://sumo.sourceforge.net/>
- [11] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria Ruchu*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1999.
- [12] http://www.civil.utah.edu/~zhou/NEXTA_for_TRANSIMS.html
- [13] Maciejewski M., Maciejewski M.: *Mikroskopowa symulacja ruchu drogowego dla obszaru miejskiego z wykorzystaniem systemu SUMO*. VII Krajowe Sympozjum Modelowanie i Symulacja Komputerowa w Technice, 22-23 kwietnia, 2010, Łódź
- [14] <http://www.ptvag.com/>
- [15] <http://zumi.pl/>