

Od makroskopowego modelu popytu na podróże do całodobowej mikroskopowej symulacji przepływu ruchu

Michał Maciejewski, Bartłomiej Piątkowski, Waldemar Walerjańczyk

W artykule omówiono problematykę przejścia od makroskopowego modelu popytu na podróże do całodobowej mikroskopowej symulacji przepływu ruchu na przykładzie aglomeracji poznańskiej. W pierwszej części przedstawiono makroskopowy model podróży będący punktem startu do stworzenia mikroskopowego modelu symulacyjnego. W kolejnej części wyjaśniono ideę działania systemu MATSim oraz założenia i uproszczenia w budowanym modelu. Następnie omówiono procedurę generacji modelu sieci drogowej na podstawie map cyfrowych OpenStreetMap. Kolejna część artykułu skupia się na wykorzystaniu danych o zagospodarowaniu przestrzennym dostępnych w mapach OSM w celu mikroskopowej generacji miejsc aktywności w oparciu o makroskopowy podział na rejony komunikacyjne. Wyniki symulacji otrzymane dla skalibrowanego modelu omówiono w następnym punkcie. Artykuł kończy krótkie podsumowanie zrealizowanych prac i planów dalszej rozbudowy modelu. Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu z konferencji „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań – Rosnówko, 19-21.06.2013.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 04.10.2013

data akceptacji do druku: 13.01.2014



dr inż.
Michał Maciejewski
Instytut Maszyn
Roboczych i Pojazdów
Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
michal.maciejewski@put.poznan.pl



mgr inż.
Bartłomiej Piątkowski
Instytut Maszyn
Roboczych i Pojazdów
Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
bartlomiej.piatkowski@doctorate.put.poznan.pl



dr inż.
Waldemar Walerjańczyk
Instytut Maszyn
Roboczych i Pojazdów
Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
waldemar.walerjanczyk@put.poznan.pl

makroskopowego. W prowadzonych badaniach wykorzystano makroskopowy model podróży w aglomeracji poznańskiej stworzony zgodnie z klasycznym podejściem czterostadiowym. Został on zbudowany na podstawie Kompleksowych Badań Ruchu przeprowadzonych w roku 2000 [5], a następnie w roku 2008 przeszedł aktualizację [14]. Makroskopowy model podróży stanowił jedno z podstawowych źródeł danych do budowy mikroskopowej symulacji ruchu dla całej aglomeracji. Z tego modelu wykorzystane zostały dane opisujące popyt na podróże, tj. macierze OD z rozbiciem na poszczególne godziny, środki transportu oraz rodzaje motywacji, a także podział aglomeracji na rejony komunikacyjne. Na rys. 1 przedstawione zostały wyniki rozkładu potoków ruchu w sieci drogowej

aglomeracji poznańskiej w czasie szczytu porannego (7:00–8:00) dla modelu skalibrowanego na rok 2015.

Całodobowa mikroskopowa symulacja ruchu – założenia

Symulację mikroskopową przeprowadzono w MATSim [2,11,15], systemie wieloagentowej mikroskopowej symulacji transportu, a w szczególności ruchu drogowego. System ten jest oparty na modelach aktywności syntetycznych mieszkańców zwanych agentami (każdy agent posiada co najmniej jeden całodzienny plan aktywności). Idea symulacji w MATSim polega na iteracyjnym wykonywaniu następujących trzech podstawowych faz: 1. planowanie (agenci modyfikują istniejące lub tworzą nowe plany),



1. Makroskopowy rozkład potoków ruchu w sieci drogowej aglomeracji poznańskiej

Makroskopowy model popytu na podróże

W przypadku przejścia z makroskopowego modelu popytu na podróże do mikroskopowego modelu symulacyjnego przepływu ruchu niezwykle ważnym elementem, poza samym procesem uszczegóławiania modelu, jest obranie jako punktu startu możliwie jak najlepszego modelu

2. wykonanie planów (symulacja ruchu, czyli tzw. ładowanie sieci; agenci wykonują krok po kroku założone plany),
3. ocena planów (agenci oceniają swoje plany na podstawie zdarzeń zarejestrowanych podczas symulacji).

Każda iteracja może być interpretowana jako jeden dzień. Dzięki iteracyjnemu powtarzaniu symulacji agenci uczą się na podstawie zdobytych doświadczeń i próbują poprawiać swoje plany. Przy dostatecznie dużej liczbie iteracji oraz odpowiednio dostrojonych parametrach systemu (w szczególności definiujących możliwości adaptacyjne agentów), przebieg kolejnych symulacji stabilizuje się (osiągany jest tzw. stan relaksacji, odpowiednik stochastycznego stanu równowagi w systemie transportowym) [1,12].

Symulacja ruchu drogowego (faza 2) jest zrealizowana w oparciu o teorię kolejek, tj. ruch odbywa się w sieci, której odcinki zamodelowane są jako kolejki FIFO (ang. *First In – First Out*). Podczas symulacji agenci wykonują zaplanowane aktywności oraz podróżują w sieci pomiędzy miejscami odbywania kolejnych aktywności. Faza oceny (faza 3) polega na ocenie realizacji planów na podstawie rejestru (tj. historii) zdarzeń mających miejsce w trakcie symulacji. Znając ocenę planu wykonywane jest następnie planowanie aktywności na kolejny dzień (kolejną iterację; faza 1).

W ramach prac nad konwersją modelu makroskopowego do mikroskopowego przyjęto uproszczenie polegające na tym, że wykorzystano 24 jednogodzinne macierze OD dla każdej z 9 motywacji (łącznie 216 macierzy), wyznaczone w ramach trzech pierwszych etapów podejścia czterostadio-

wego. Następnie macierze OD zostały bezpośrednio przełożone na plany agentów wprowadzając uproszczenie, że 1 podróż w macierzy OD to 1 agent w MATSim (łańcuchy o długości 2). Momenty rozpoczęcia podróży przez agentów zostały równomiernie rozłożone w ramach całej godziny, stąd w ramach fazy planowania zrezygnowano z modyfikacji chwili rozpoczęcia podróży, pozostawiając agentom tylko możliwość zmiany trasy w celu znalezienia najkrótszej czasowo trasy. Przy powyższych uproszczeniach można stwierdzić, że zastosowane podejście do symulacji z wykorzystaniem systemu MATSim jest odpowiednikiem iteracyjnego stochastycznego rozkładu ruchu w sieci, z tą zasadniczą różnicą, że w klasycznym podejściu do określenia czasu przejazdu wykorzystuje się funkcję oporu odcinka zależną od natężenia ruchu, natomiast w MATSim przeprowadzana jest kolejkowa symulacja przepływu ruchu, na podstawie której wyznacza się a posteriori czasy przejazdu.

Mikroskopowy model sieci drogowej

Jednym z nieodzownych elementów mikroskopowego modelu ruchu jest dokładna reprezentacja sieci drogowej. Przejście z modelowania na poziomie makroskopowym do symulacji mikroskopowej wymaga podjęcia decyzji odnośnie do poziomu szczegółowości odwzorowania infrastruktury drogowej. W przypadku modeli mikroskopowych istnieje możliwość bardzo dokładnego zamodelowania różnych elementów tej infrastruktury, m.in. geometrii dróg, sygnalizacji świetlnej, czy ograniczeń określonych przez oznakowanie. Niemniej jednak przy budowie wielkoskalowego modelu mikro-

skopowego jakim niewątpliwie jest model aglomeracji poznańskiej, niemożliwe jest tak szczegółowe odwzorowanie całej sieci drogowej. Ograniczenia są tu dwójakiego rodzaju: dostępność i poprawność danych oraz restrykcje narzucone przez narzędzie stosowane do symulacji, w tym przypadku system MATSim. Dlatego przed przystąpieniem do prac nad budową modelu sieci drogowej poczyniono następujące założenia:

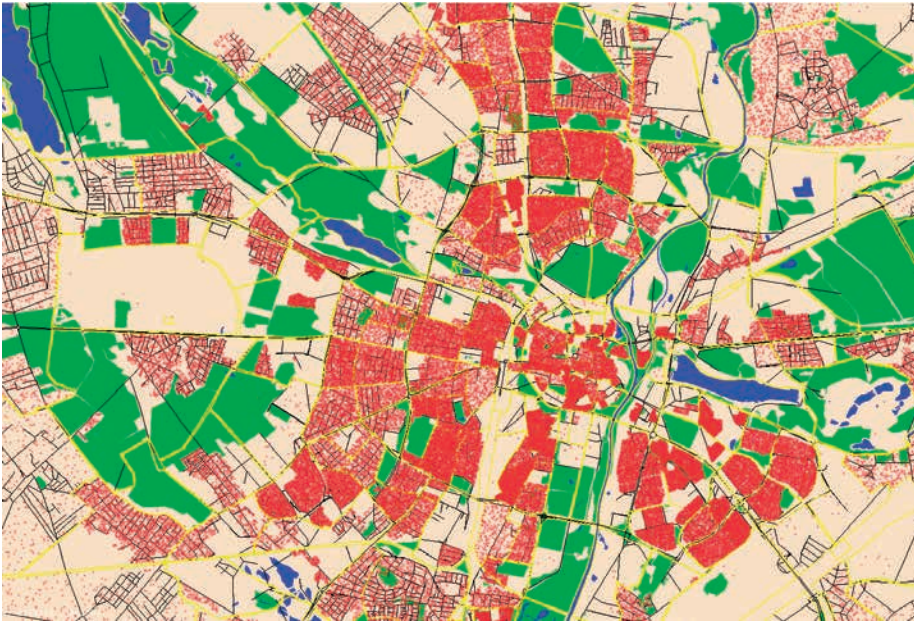
- Węzły odpowiadają skrzyżowaniom, a drogi pomiędzy nimi reprezentowane są przez odcinki posiadające odpowiednie charakterystyki zależne od typu drogi. Wśród atrybutów wyróżnia się liczbę pasów, długość, przepustowość oraz prędkość w ruchu swobodnym.
- Z uwagi na duże rozproszenie, nieprecyzyjność i często niespójność danych o sygnalizacji świetlnej konieczna była rezygnacja z jej modelowania. Uwzględniając rozległość modelu ręczne opracowanie danych było niemożliwe. Należy zauważyć, że system MATSim nie stanowi tu ograniczenia, ponieważ posiada moduł symulacji sygnalizacji świetlnej [4].
- W modelu uwzględniono następujące ograniczenia: jednokierunkowość dróg (wszystkie), zakazy skrętów (część) oraz pierwszeństwo przejazdu (pośrednio, tj. poprzez uzależnienie przepustowości wlotów na skrzyżowaniach od klasy dróg). Jednoczesne założenie dużej rozległości i szczegółowości modelu spowodowało konieczność opracowania metod automatycznej obróbki map cyfrowych (w pracach zastosowano mapy OpenStreetMap (OSM)) w celu szybkiego i możliwie jak najbardziej precyzyjnego odwzorowania sieci drogowej. Szczegółowo problematykę generowania modelu sieci drogowej na podstawie map OSM przedstawiono w pracy [7].

Podstawowym problemem związanym ze stosowaniem map cyfrowych jest możliwość jak najdokładniejsze wyznaczenie podstawowych charakterystyk odcinków, takich jak liczba pasów, długość, przepustowość oraz prędkość w ruchu swobodnym. Niestety mapy cyfrowe, zarówno darmowe jak i komercyjne, nie posiadają pełnego zestawu informacji o każdym pojedynczym odcinku drogi, co jest konieczne do stworzenia modelu symulacyjnego. Dlatego w ramach prac nad modelem zaimplementowano algorytm, który na podstawie wbudowanych zestawów reguł estymował wartości brakujących atrybutów na podstawie wartości istniejących atrybutów, takich jak klasa drogi, jednokierunkowość itp. [7].

Kolejnym istotnym problemem przy budowie modelu sieci drogowej jest podjęcie decyzji odnośnie do najniższej klasy dróg



2. Mikroskopowy model sieci drogowej aglomeracji poznańskiej



3. Rozkład miejsc aktywności dom z uwzględnieniem zagospodarowania przestrzennego

uwzględnionych w modelu, co wynika w głównej mierze od przyjętego poziomu szczegółowości. Co więcej, decyzja ta może być inna w przypadku centralnego obszaru sieci drogowej, gdzie wymagana jest wyższa szczegółowość, a inna dla obszarów brzegowych. W przypadku modelowania układu drogowego dla aglomeracji poznańskiej zdecydowano się przeprowadzić badania symulacyjne, aby określić wpływ dokładności modelu sieci drogowej na wyniki symulacyjne [7]. Otrzymane wyniki wskazały, że uwzględnienie odcinków wszystkich klas od autostrada do droga osiedlowa pozwala na uzyskanie odpowiedniej przepustowości sieci drogowej. Natomiast ograniczenie modelu do klas dróg w zakresie autostrada – drogi gminne powoduje istotny spadek przepustowości modelu.

Rys. 2 przedstawia finalną wersję mikroskopowego modelu sieci drogowej aglomeracji poznańskiej składającego się z ponad 17000 węzłów i ponad 40000 odcinków. Porównując ten rysunek z rys. 1 można zauważyć znaczący wzrost szczegółowości odwzorowania sieci drogowej, zarówno w obszarze miasta Poznań jak i poza jego granicami.

Mikroskopowy rozkład przestrzenny miejsc aktywności

Wręcz ze wzrostem szczegółowości modelu sieci drogowej konieczne jest przeprowadzenie analizy wpływu większej szczegółowości rejonów komunikacyjnych na jakość otrzymywanych wyników. W przypadku klasycznego czterostadiowego podejścia przyjmuje się, że punkty centralne rejonów komunikacyjnych, tj. centroidy, skupiają w sobie potencjały generowania i absorbowania podróży, a rejonu komuni-

kacyjne powinny być homogeniczne [6,10]. Niestety podział obszaru na rejonu wiąże się z przyjęciem pewnych uproszczeń, w szczególności co do homogeniczności rejonów jak i struktury połączeń centroid z siecią drogową. W przypadku mikroskopowej symulacji te uproszczenia są często zbyt daleko idące, zwłaszcza w przypadku obszarów miejskich.

Rozwiązaniem problemów z centroidami może być całkowita rezygnacja z centroid i zastosowanie jednorodnego rozkładu miejsc aktywności (tj. początków i końców podróży). Niestety przy przejściu ze skali makro do mikro mamy często do czynienia z rozległymi i niejednorodnymi rejonami, np. rejon oprócz zabudowy mieszkaniowej posiada także tereny zielone lub „punkty” generator/absorber podróży w postaci szkoły czy sklepu wielkopowierzchniowego. Aby zwiększyć dokładność generacji miejsc aktywności można wykorzystać dane GIS o zagospodarowaniu przestrzennym. Znając rodzaj aktywności możemy ograniczyć obszar całego rejonu komunikacyjnego do tych podobszarów, w którym dana czynność może zostać wykonana (np. celem wyjazdu na zakupy będzie sklep, a nie szkoła).

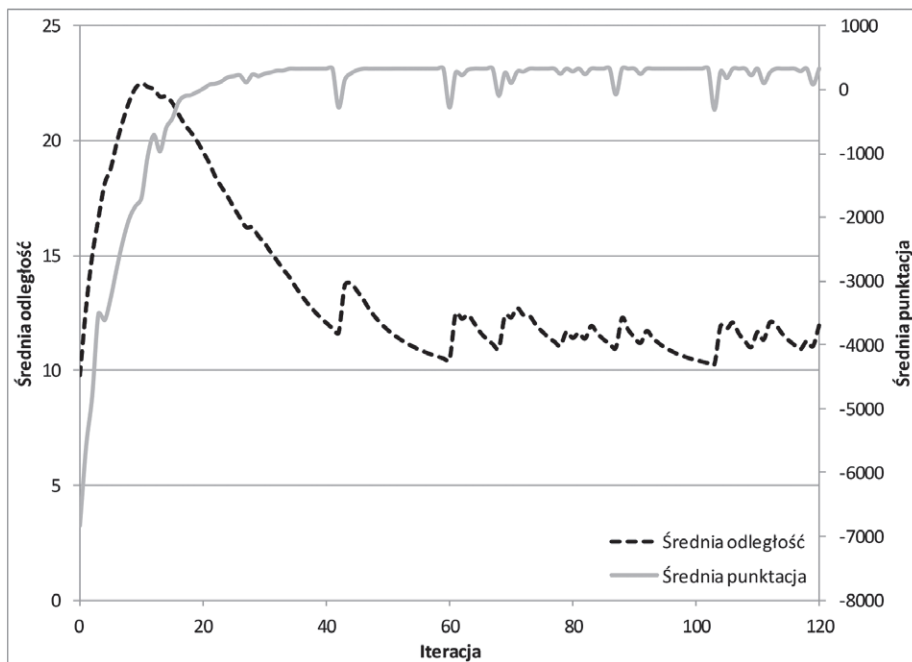
W ramach prac nad modelem aglomeracji poznańskiej wyróżniono pięć podstawowych rodzajów zagospodarowania przestrzennego: zabudowa mieszkaniowa, zabudowa przemysłowa, lasy i tereny zielone, zabudowa usługowa oraz szkoły. Następnie zdefiniowano reguły określające możliwość wykonywania czynności danego typu w podobszarze (rejonu komunikacyjnego) o określonym rodzaju zagospodarowania przestrzennego. Zaimplementowany algorytm rozkładu prze-

strzennego uwzględnia również przypadki niepełnej informacji o typie zagospodarowania w danym rejonie lub jej całkowitego braku. Do rozkładu przestrzennego miejsc aktywności wykorzystano zestaw 216 macierzy OD, z których każda opisywała jednogodzinną więźbę ruchu dla jednej z dziewięciu typów motywacji na przestrzeni całej doby ($9 \times 24 = 216$). Bardziej szczegółowy opis metody rozkładu miejsc aktywności oraz omówienie otrzymanych rezultatów można znaleźć w pracy [8].

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe rozmieszczenie miejsc aktywności związanych z motywacją **dom**. Podróże, które odbywają się z/do domu mogą rozpoczynać się/kończyć w określonym rejonie komunikacyjnym, ale tylko w określonym podobszarze, w którym występuje zabudowa mieszkaniowa, a nie las, szkoła czy zakład przemysłowy.

Całodobowa mikroskopowa symulacja ruchu – wyniki

Choć automatyczne przetworzenie szczegółowych danych GIS o sieci drogowej i zagospodarowaniu przestrzennym jest konieczne dla przeprowadzenia szczegółowej mikroskopowej symulacji ruchu dla tak dużego obszaru, nie stanowi ono jednak gwarancji otrzymania poprawnie działającego modelu. Z uwagi na przyjęte uproszczenia oraz niekompletność danych, zarówno podczas tworzenia modelu sieci drogowej jak i generacji rozkładu miejsc aktywności, otrzymany model symulacyjny wymagał szczegółowej kalibracji. W przypadku aglomeracji poznańskiej badania symulacyjne przeprowadzono przy założeniu różnych wariantów parametrów kalibrujących przepustowość (*flow capacity*) i pojemność odcinków (*storage capacity*) z rozróżnieniem na typy odcinków (klasy dróg). Otrzymane zmienne w czasie natężenia ruchu na odcinkach porównywano z natężeniami ruchu na wybranych pętach indukcyjnych, ponadto analizowano zmianę liczby pojazdów w sieci w czasie. W przyszłości, po wprowadzeniu całodziennych łańcuchów aktywności, planowane jest przeprowadzenie procesu kalibracji po stronie popytowej w oparciu o oprogramowanie Cadyts [3,13]. W trakcie badań także skupiono uwagę na doborze wartości parametrów definiujących możliwości adaptacyjne agentów. Z uwagi na poczynione uproszczenia najważniejszym parametrem było prawdopodobieństwo zmiany trasy w kolejnej iteracji. Stosunkowo najlepsze rezultaty osiągnano dla wartości 0,1 (losowe 10% agentów zmienia trasę). Gdy parametr ten przyjmował wyższe wartości,

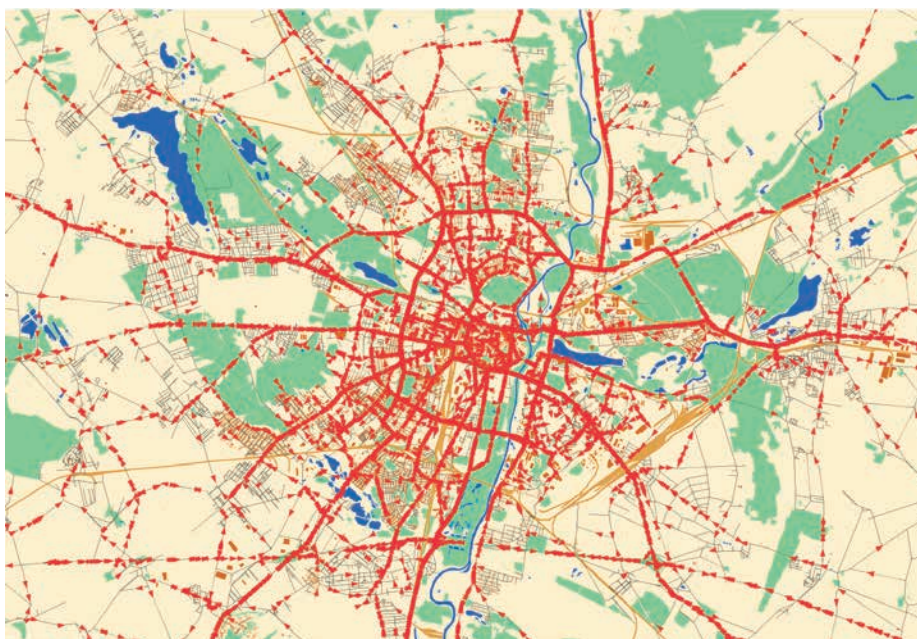


4. Średnia przejechana odległość i średnia otrzymana punktacja dla kolejnych iteracji mikroskopowej symulacji ruchu drogowego w aglomeracji poznańskiej

trudno było osiągnąć stan relaksacji procesu symulacji, co wynikało z dużych oscylacji wokół punktu równowagi. Z kolei dla niższych wartości parametru proces zbieżności był znacznie wolniejszy. W kalibracji uwzględniono także następujące statystyki: średni czas przejazdu, średnia przejechana odległość, średnia prędkość w sieci, praca przewozowa oraz wykresy dojazdów do celu w czasie.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki przeprowadzenia 120 iteracji symulacji dla skalibrowanego modelu. Można zauważyć, że w zerowej iteracji każdy z agentów wybiera najkrótszą czasowo trasę przy założeniu ruchu swobodnego na wszystkich odcinkach (w tym momencie nie są znane czasy

przejazdu w obciążonej sieci), dlatego też ta iteracja charakteryzuje się najkrótszymi przebytymi odległościami, tj. średnio ok. 9,8 km. Niestety powoduje to znaczne kongestie w sieci, na co wskazuje m.in. niska punktacja otrzymana planów agentów na koniec tej iteracji. Co iterację 10% losowo wybranych agentów ma możliwość zmiany trasy przejazdu. Skutkuje to stopniowym zmniejszaniem się kongestii (rośnie punktacja) kosztem wybierania dłuższych tras omijających korki (rośnie dystans). Średni przebyty dystans osiąga maksimum w 10 iteracji (ok. 22,5 km), po czym maleje i po ok. 40 iteracjach stabilizuje się i oscyluje na poziomie ok. 11,5 km. Co ciekawe, skrócenie się przebytego dystansu nie skutkuje



5. Mikroskopowa symulacja ruchu drogowego w aglomeracji poznańskiej (godz. 7:00)

wzrostem kongestii – średnia punktacja planów wykonywanych przez agentów także stabilizuje się po 40 iteracjach. Pomiędzy iteracją 40 a 120 sytuacja nie ulega znaczącym zmianom, można natomiast zauważyć interesujące zjawisko: agenci co iterację próbują skracać trasy aż do momentu, gdy przekroczona jest przepustowość niektórych odcinków i pojawia się kongestia (np. w iteracjach 42, 60, 68 itd.), co skutkuje zauważalnym wydłużeniem średniego czasu przejazdu i spadkiem punktacji. W efekcie w kolejnej iteracji (odpowiednio iteracja: 43, 61, 69 itd.) agenci chcąc uniknąć kongestii wybierają dłuższe trasy, co skutkuje wzrostem średniej długości tras.

Szczegółowa prezentacja procesu kalibracji modelu oraz analiza wyników otrzymanych dla skalibrowanego modelu wychodzi poza zakres tego artykułu, skupiającego się na opisie przejścia ze skali makro do mikro, i jest tematem pracy [9]. W niniejszej pracy ograniczono się do zaprezentowania rysunków ilustrujących stan symulacji o godzinie 7:00 (rys. 5 i rys. 6).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę przejścia od makroskopowego modelu popytu na podróże do całodobowej mikroskopowej symulacji przepływu ruchu. Przy jednoczesnym założeniu tak dużej rozległości i szczegółowości systemu transportowego konieczne było wdrożenie metod pozwalających na możliwie jak największą automatyzację tego procesu. W tym celu autorzy wykorzystali mapy cyfrowe OpenStreetMap i opracowali szereg narzędzi informatycznych służących do ich obróbki. Pozwoliło to na znacznie skrócenie czasu poświęconego na przygotowanie danych wejściowych do modelu, takich jak sieć drogowa czy rozkład przestrzenny miejsc aktywności z uwzględnieniem zagospodarowania przestrzennego.

W ramach badań przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe mające na celu wykazanie wpływu poziomu szczegółowości wykorzystywanego modelu sieci na wyniki symulacji. Wykazano, że mało szczegółowa sieć (ograniczająca się do dróg gminnych) skutkuje spadkiem (łącznej) przepustowości sieci i w konsekwencji pojawieniem się dużych kongestii na drogach głównych. Dlatego konieczne było uwzględnienie ulic i dróg osiedlowych.

Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie danych o zagospodarowaniu przestrzennym nie ma istotnego wpływu na ogólny obraz ruchu w całej aglomeracji (skala makro),



6. Mikroskopowa symulacja ruchu drogowego w centrum Poznania (godz. 7:00)

natomiast determinuje rozkład ruchu w ramach pojedynczych rejonów (skala mikro). Dlatego wykorzystanie informacji o zagospodarowaniu przestrzennym i zabudowie wydaje się szczególnie zasadne w badaniach wpływu konkretnej inwestycji budowlanej na warunki ruchowe w sieci, zwłaszcza w okolicach planowanej inwestycji.

Autorzy pragną zaznaczyć, że prezentowany symulacyjny model przepływu ruchu w aglomeracji poznańskiej jest w ciągłej rozbudowie. Prezentowane wyniki symulacji stanowią jeden z etapów prac mających na celu stworzenie wieloagentowej behawioralnej symulacji przepływu ruchu w systemie MATSim dla całej doby i w oparciu o całodniowe łańcuchy aktywności ruchu. Planowana jest także jego aktualizacja na podstawie wyników powstającego obecnie *Planu zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego Aglomeracji Poznańskiej na lata 2014-2020*. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Balmer M., Axhausen K.W., Nagel K. An Agent Based Demand Modeling Framework for Large Scale Micro-Simulations. Working paper, 329, Institute for Transport Planning and Systems (IVT), ETH Zurich, Switzerland, 2005.
- [2] Balmer M., Rieser M., Meister K., Charypar D., Lefebvre N., Nagel K. MATSim-T: Architecture and Simulation Times. W: Bazzan A. L. C., Klügl F. (red.) Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering. Hershey, 2008, s. 57-78.
- [3] Flötteröd G., Bierlaire M., Nagel K. Bayesian demand calibration for dynamic traffic simulations. *Transportation Science*, 45(4), 2011, s. 541-561.
- [4] Grether D., Neumann A., Nagel K. Simulation of Urban Traffic Control: A Queue Model Approach. *Procedia Computer Science*, 10, 2012, s. 808-814.
- [5] Krych A. i inni. KBR Poznań 2000 – Diagnoza i wnioski. Biuro Inżynierii Transportu BIT, Poznań, 2000.
- [6] Ortuzar J. D., Willumsen L. *Modelling Transport*. Wiley, 2011.
- [7] Piątkowski B., Maciejewski M. Zastosowanie map OSM w budowie modelu sieci dla aglomeracji poznańskiej. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie*, 2(98)/2012, s. 163-177.
- [8] Piątkowski B., Maciejewski M. Zastosowanie danych GIS o zagospodarowaniu przestrzennym w mikroskopowej symulacji ruchu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport*, 95, 2013, s. 411-419.
- [9] Piątkowski B., Maciejewski M., Walerjańczyk W., Szarata A. Mikroskopowa całodobowa symulacja ruchu drogowego w aglomeracji poznańskiej. X Konferencja Naukowo-Techniczna Systemy Transportowe Teoria i Praktyka Katowice, 9-10 września, 2013.
- [10] Podoski J. *Transport w miastach*. Wydawnictwo WKŁ, Warszawa, 1985.
- [11] Rieser M. Adding Transit to an Agent-Based Transportation Simulation: Concepts and Implementation. Praca doktorska, Technische Universität Berlin, 2010.
- [12] Rieser M., Nagel K., Beuck U., Balmer M., Rümenapp J. Truly agent-oriented coupling of an activity-based demand generation with a multi-agent traffic simulation. *Transportation Research Record*, 2021, 2007, s. 10-17.
- [13] transp-or.epfl.ch/cadyts/, 20.10.2013.
- [14] Szarata A. Aktualizacja modelu symulacyjnego aglomeracji poznańskiej wraz z prognozami. Raport niepublikowany, Kraków, 2009.
- [15] www.matsim.org, 20.10.2013.