

Makroskopowy model przepływu ruchu w sieci drugiego rzędu – alternatywny opis stanu sieci

Rafał Kucharski

Powszechna jest krytyka uproszczonej reprezentacji zjawisk w sieci transportowej za pomocą makroskopowych funkcji oporu, które nie są w stanie opisać powstawania i rozładowywania się kolejek pojazdów, chwilowej utraty płynności, dobowych wahań natężeń ruchu i rozplywania się kolejek. W opinii dużej części ekspertów jedyną alternatywą jest modelowanie sieci w skali mikro, metodami symulacyjnymi. W referacie tym pokazano podejście alternatywne, stosowane w dynamicznych makroskopowych modelach ruchu: tzw. modele przepływu ruchu drugiego rzędu będące rozwinięciem fundamentalnego diagramu ruchu. Są one w stanie odzwierciedlić wymienione wyżej zjawiska, wymagają znacznie mniej danych wejściowych niż modele mikroskopowe i wykonują obliczenia w znacznie krótszym czasie. W opinii autora wyniki takiego modelu są bardziej wartościowe i dają pełniejszą informację o funkcjonowaniu sieci transportowej. Zamiast szczegółowych wyników symulacji, która jest jedynie jedną z możliwych realizacji procesu stochastycznego, otrzymujemy najbardziej prawdopodobny wynik przekazany w zagregowanej formie. Modele takie mogą być wykorzystywane w czasie rzeczywistym modelach dużych sieci transportowych dostarczając szczegółowych informacji o stanie sieci, w referacie pokazano wyniki otrzymane w modelu krakowskim. 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



mgr inż.
Rafał Kucharski
doktorant Katedra Systemów Transportowych,
Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
rafalkucharski@gazeta.pl

Wstęp

Cel modelowania ruchu to (w dużym uproszczeniu) określenie stanu sieci transportowej, przy czym pożądany opis jest zależny od potrzeb. Tradycyjnie wyróżnia się dwa podstawowe opisy:

- całkowity potok pojazdów przejeżdżających przez element sieci w czasie symulacji (najczęściej godzina, czasem doba),
- położenie każdego pojazdu w czasie przy niemal ciągłej reprezentacji czasu.

Opis pierwszy w literaturze nazywany jest makroskopowym, a drugi mikroskopowym.

Poniżej pokazano rozwinięcie metody makroskopowej, które pozwala opisać znacznie więcej zjawisk niż metoda tradycyjna, omijając przy tym największe problemy metod mikroskopowych (czas obliczeń i losowość wyników).

Struktura niniejszego referatu jest następująca. Akapit drugi pokazuje miejsce modelu przepływu ruchu w modelowaniu. Akapit trzeci to opis i porównanie tradycyjnych makroskopowych i mikroskopowych modeli sieci wraz z modelami obliczania kosztów w sieci. W akapicie czwartym pokazany jest makroskopowy model przepływu ruchu na przykładzie *General Link Transmission Model*

(GLTM). W pierwszej części pokazano podstawy teoretyczne modelu, w drugiej pokazano i omówiono przykładowe wyniki, w tym wyniki eksperymentów na modelu krakowskim.

Wiele z przytaczanych tutaj pojęć nie ma odpowiedników w języku polskim, podjąłem próbę tłumaczenia pojęć podając w nawiasie oryginały angielskie.

Struktura modelu ruchu

Dla pełnego zrozumienia opisywanego modelu (GLTM) warto umiejscowić go w ogólnej strukturze modelu ruchu.

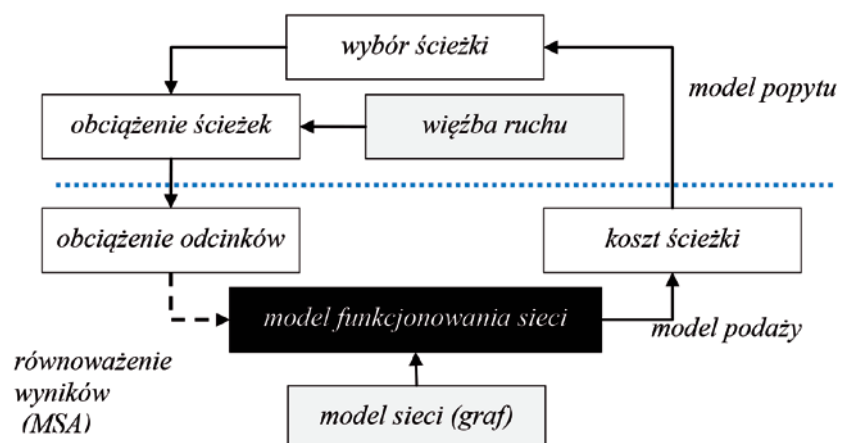
Model ruchu jest wynikiem interakcji modelu podaży i modelu popytu. Różnica pomiędzy opisem makroskopowym i mikroskopowym zaznacza się głównie na poziomie modelu podaży. Model popytu dla obydwu modeli będzie praktycznie taki sam.

W ogólności model podaży odpowiada na pytanie jaki jest koszt przepływu przez daną sieć określonego popytu [2] Model po-

daży składa się z: a) modelu sieci (np. graf) i b) modelu funkcjonowania sieci (*network performance model*). Model funkcjonowania sieci jest w istocie funkcją kosztu od przepływu. Koszty te obliczane są dla pojedynczych elementów sieci (odcinków, lub relacji skrajnych).

Na Rys. 1 przedstawiono podstawowy, uproszczony mechanizm rozkładu ruchu na sieć. Elementy zaznaczone na szaro to dane wejściowe modelu (niezmienne w trakcie iteracji), element oznaczony kolorem czarnym jest przedmiotem niniejszego referatu. GLTM jest modelem funkcjonowania sieci, który w ogólnej strukturze modelu odpowiada na pytanie: „Jak rozplywa się popyt (pojazdy) po sieci drogowej w czasie?”. Na podstawie tej odpowiedzi obliczane są koszty przepływu sieć dla każdego elementu. Zastosowanie go nie zmienia struktury modelu ruchu, jest jedynie zastąpieniem jednego z elementów.

W klasycznych modelach makroskopowych sieć opisana jest grafem $G(N, A)$, gdzie



1. Podstawowy mechanizm rozkładu ruchu na sieć



2. Rozbudowany graf dualny zawierający relacje skrętne i geometrię (źródło własne)

N to zbiór węzłów sieci, a $A \subseteq N \times N$ to zbiór łuków sieci. W najbardziej ogólnym opisie sieci węzły nie stanowią oporu w sieci, ścieżka wybierana jest jedynie na podstawie parametrów odcinków. Dla pełniejszego opisu sieci i wykorzystania możliwości bardziej wyrafinowanych modeli przepływu (jak np. GLTM) konieczne jest rozszerzenie podstawowego grafu, np.:

- graf dualny (w którym węzłami są odcinki, a łukami relacje skrętne)
- rozbudowany graf uwzględniający pasy, relacje skrętne (np. Rys. 2).

Model makroskopowy i mikroskopowy – porównanie

Klasyczny makroskopowy model funkcjonowania sieci.

W klasycznych modelach makroskopowych sieć najczęściej opisana jest grafem $G(N, A)$, w którym opór stanowią odcinki. W modelu funkcjonowania sieci, aby odwzorować opory w sieci i zatłoczenie, stosuje się przybliżoną funkcyjną zależność pomiędzy czasem przejazdu, a wykorzystaniem przepustowości (przy czym przepustowość jest tu wyrażona w odniesieniu do długiego okresu czasu – pojazdy na godzinę, a nie na sekundę).

Czas przejazdu odcinka jest wyrażony jako rosnąca funkcja wykorzystania przepustowości – tzw. funkcja oporu. Funkcje te zazwyczaj (również w Polsce [1]) są kalibrowane na podstawie obserwacji. Należy ją traktować jako mnożnik czasu przejazdu w ruchu swobodnym: dla zerowego wykorzystania przepustowości mnożnik ten równy jest jeden, następnie rośnie aż do osiągnięcia wartości charakterystycznej przy wykorzystaniu przepustowości. Po jej przekroczeniu wartości funkcji zaczynają rosnąć gwałtownie.

Funkcja oporu jest podstawą określania kosztów dla metod rozkładu ruchu (np. *Equilibrium Wardopa*), gdzie minimalizowane są koszty przejazdu na ścieżkach. W procesie optymalizacyjnym wykorzystuje

się metodę gradientową (np. *Frank-Wolfe*), w której funkcją celu jest całka z funkcji oporu. Z tego powodu (ale również dla odpowiedniego odwzorowania zjawiska) musi ona być łatwo całkowalna, ciągła i wypukła.

Przy pomocy takiego modelu funkcjonowania sieci można odzwierciedlić jedynie przybliżone koszty przejazdu wszystkich pojazdów przez odcinek, sumaryczne wielkości potoków. Jednak już czasy przejazdu odwzorowywane są w dużym przybliżeniu, w oparciu o wątpliwe założenia. Nie ma odzwierciedlenia fizycznej pojemności odcinka (w postaci maksymalnej liczby pojazdów jakie może on pomieścić). Dla całego przedziału symulacji otrzymujemy jedną wartość (średnia, lub suma z całego okresu symulacji) nie odzwierciedlającą zmienności w czasie. Natężenie wyrażone jest w pojazdach w ciągu całego okresu rozkładu ruchu.

Matematycznie makroskopowy model funkcjonowania sieci można sformułować następująco:

$$C = \int_0^{Q(t)} f(Q) dQ \quad \text{koszt to całka funkcji oporu po natężeniu}$$

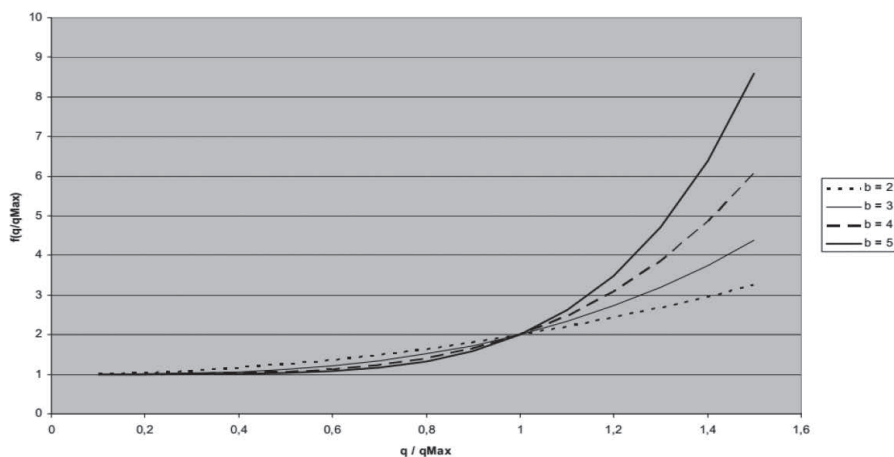
$$Q = \int_0^t q dt \quad \text{natężenie jest całką z przepływu po czasie}$$

$$f = t_0(1 + a Q_{max}^b) \quad \text{przykład funkcji oporu (BPR); } a, b \text{ parametry; } t_0 \text{ czas w ruchu swobodnym; } Q_{max} \text{ przepustowość}$$

dywidualnych atrybutów (prędkość, przyspieszenie, cel, wykonywany manewr itp.). Odpowiadają na pytanie: „Jak zachowa się kierowca pojazdu w sytuacji ruchowej w której się znajduje?”. Odpowiadają na nie dla każdego pojazdu w każdej klatce symulacji i to jest wynikiem modelowania. Jądem jest tu odwzorowanie zachowania kierowcy i skalibrowanie go tak, by odzwierciedlić faktyczne zachowanie kierowców na drodze (ruch swobodny, interakcje, reakcje, pierwszeństwa). Na podstawie podstawowych zasad interakcji między pojazdami popyt przemieszcza się wzdłuż ścieżki w czasie symulacji. Wybór ścieżki odbywa się zazwyczaj na zewnątrz modelu, wewnątrz obliczany jest tylko model funkcjonowania sieci (koszty).

Modele mikroskopowe operują na znacznie dokładniejszym opisie sieci. Zamiast prostego grafu ze sparametryzowanymi odcinkami odwzorowuje się praktycznie wszystkie istotne dla użytkownika parametry układu drogowego: pasy, ich szerokości, geometrię odcinka i skrzyżowań, plan sygnalizacji, itp. (co również może być przedstawione za pomocą grafu Rys. 2). Wymaga to znacznego nakładu pracy przy budowie modelu sieci (choć pojawia się coraz więcej zautomatyzowanych narzędzi do importu i eksportu danych o geometrii).

Modele mikroskopowe są zawsze dynamiczne – wynik (stan sieci) jest funkcją czasu.



3. Funkcje oporu [Cascetta (2001)]

Podsumowując w makroskopowym modelu ruchu zakłada się, że podaż jest sukcesywnie wykorzystywana w przez przejeżdżające pojazdy, tzn. każdy kolejny pojazd przejeżdżał będzie z coraz wyższym kosztem. Nie uwzględnia się tutaj takich czynników jak: gęstość ruchu, liczba pojazdów na odcinku, możliwość opuszczenia odcinka, itd.

Podejście symulacyjne – model mikroskopowy

Modele mikroskopowe traktują każdy pojazd osobno z uwzględnieniem jego in-

Każdy pojazd może być opisany podstawowymi parametrami dynamiki ruchu: położeniem w czasie, prędkością, przyspieszeniem. Parametry te są następnie agregowane do wartości uśrednionych, maksymalnych, czy rozkładów statystycznych. Zazwyczaj symulowany jest długi okres czasu (np. pół godziny), a dyskretyzacja czasu symulacji jest dość gęsta (np. 1 sekunda).

Wynikiem symulacji może być:

- animacja pokazująca stan sieci w czasie (ma wartość estetyczną, marketingową, ale także pozwala na bardzo szybki ogląd i ocenę sytuacji).

Tabela 1. Wady i zalety modeli mikro- i makroskopowych

	makro	mikro
zalety	prostota łatwa kalibracja szybkość obliczeń łatwe całkowanie podstawowe odzwierciedlenie ograniczonej przepustowości	dobra reprezentacja zjawisk możliwość stworzenia animacji podłoże behawioralne pojedyncze pojazdy różne klasy pojazdów i użytkowników
Wady	nierealistyczny, uproszczony opis brak dynamiki (zmian w czasie) nie uwzględnianie pojemności odcinka brak kolejek nieskończone czasy przejazdu przy dużej gęstości ruchu	duży nakład pracy przy kodowaniu sieci duży czas obliczeń trudność kalibracji symulacja jest procesem losowym (wynik jest funkcją symulacji)

- szczegółowe wyniki dla poszczególnych pojazdów, lub elementów sieci (trajektoria pojazdu, lub szczegółowe dane dla odcinka, relacji skrajnej, skrzyżowania)
- zagregowane uśrednione wyniki dla elementu sieci (np. średnie straty czasu).

Modele makroskopowe odzwierciedlają podstawowe mechanizmy w sieci istotne do jej późniejszego, pełnego opisu, takie jak:

- prędkość w ruchu swobodnym
- spadek prędkości w miarę wzrostu gęstości ruchu
- interakcje pomiędzy dwoma pojazdami na prostym odcinku drogi (pojazd szybszy zbliża się do wolniejszego)
- priorytety (wyjazd z drogi podporządkowanej, lewoskręt)
- budowanie się kolejek i ich zanikanie
- rozlewanie się kolejek (długość kolejki większa niż długość odcinka)
- sygnalizacji świetlnej
- podstawowe narzędzia adaptacyjne (akomodacyjne programy sygnalizacji, priorytety, sygnalizacja wzbudzana, etc.)

Modele mikroskopowe oferują bardzo dokładne odwzorowanie wymagając przy tym bardzo dużego nakładu obliczeń (nakład obliczeń rośnie logarytmicznie wraz ze wzrostem liczby symulowanych pojazdów). Są one wrażliwe na dużą liczbę parametrów wejściowych, których bezpośredni efekt na symulację ciężko opisać analitycznie (wynik symulacji to efekt wartości kilkudziesięciu parametrów), stąd trudności w kalibracji. Modele mikroskopowe mają naturę stochastyczną – jedna symulacja pokazuje jedynie pojedynczą realizację procesu stochastycznego wylosowaną z całego spektrum możliwych realizacji. Modele rozkładu ruchu, czy wyboru ścieżki opierają się na wartościach średnich dla sieci, stąd nie można w nich bezpośrednio stosować wyników mikrosymulacji do opisu najbardziej prawdopodobnego stanu sieci.

Matematycznie model mikroskopowy można sformułować następująco:

$$C = f(x) \quad \text{- koszty są funkcją agregującą stan sieci w czasie}$$

$$x = x(t) \quad \text{- stanu sieci jest wektorem położenia pojazdów w czasie}$$

$$x_{it} = f(\varphi, x_{i,t-1}, v_{i,t-1}, x_{t-1}) \quad \text{- położenie pojazdu w czasie } t \text{ jest funkcją m.in.: czynnika losowego } \varphi, \text{ poprzedniego położenia } t-1, \text{ poprzedniej prędkości } v, \text{ oraz położenia pozostałych pojazdów}$$

Porównanie i ocena makroskopowego i mikroskopowego modelu funkcjonowania sieci

W Tab. 1 pokazano wady i zalety modelu mikro- i makroskopowego.

Model makroskopowy w uproszczony sposób oddaje podstawową charakterystykę układu drogowego przy bardzo krótkim czasie obliczeń. Jest szczególnie przydatny przy analizowaniu całości sieci i jej stanu, analizowaniu właściwości systemu, szukaniu rozwiązań i optymalnych zmian w sieci, bardziej niż w odzwierciedlaniu rzeczywistości i opisywaniu zjawisk takimi jak w rzeczywistości są.

Model mikroskopowy działa znacznie wolniej, oferując w zamian pełny opis stanu sieci, będący jednak wynikiem procesu losowego (każda symulacja da inny wynik). Do analiz strategicznych, czy porównywania wariantów nie stosuje się symulacji, której wynik jest procesem losowym, nawet wielokrotne powtórzenie symulacji nie gwarantuje otrzymania rzeczywistego rozkładu losowego. Metody symulacyjne powinny być używane jedynie gdy potrzeba dokładnej analizy zjawiska i odwzorowania nietypowych parametrów sieci z dokładnością do jednego pojazdu.

Makroskopowy model przeływu ruchu

W ostatnich latach bardzo mocno rozwijane były dynamiczne modele ruchu. Modele takie (opisujące stan sieci zmienny w czasie) wymagały sprawnego modelu przepływu ruchu w sieci, który: a) odzwierciedla zjawiska dynamiczne b) może być użyty dla rzeczywistych modeli dużych metropolii. To było przyczynkiem do rozwinięcia makroskopowych modeli przepływu ruchu w sieci. Należy tu wymienić chociażby model przepływu między komórkami odcinka - *Cell Transmission Model* [3]) model kinematyki gazu [13], czy

modele stosowane w obszarowym sterowaniu ruchem (SPOT, SCOOT, SCATS, UTOPIA). Kompleksowy przegląd modeli przepływu ruchu znajduje się w [10], w niniejszym referacie do opisu wybrano model GLTM [15].

Makroskopowe modele przepływu mają długą historię. Pierwszy diagram fundamentalny został zapisany przez [9] i opisywał tylko statyczne relacje między pojazdami. Do ich opisu w czasie i przestrzeni posłużyła analogia fal kinematycznych (LWR) [11]; rozwinięta przez [12] podsumowana przez [4]. Przez ostatnie lata zapomniane po zachwyceniu się metodami symulacyjnymi, wydaje się że zaczynają wracać do łask.

Wprowadzenie teoretyczne – Wstęp

Przedstawiony model (GLTM) opiera się o trzy podstawowe zmienne i trzy podstawowe teorie opisane poniżej. Na ich podstawie możliwe jest opisanie stanu sieci zmiennej w czasie. Efektem modelu jest określenie podstawowych parametrów ruchu dla każdego elementu sieci w każdym czasie (typowa dyskretyzacja czasu co np. 10 sekund, 1 sekunda dla dokładniejszych analiz)

Zmienne

Ruch opisany jest trzema podstawowymi zmiennymi: natężeniem przepływu q , gęstością ruchu k , oraz średnią prędkością v . Tylko dwie z tych trzech zmiennych są niezależne, do pełnego opisu ruchu wystarczą dwie z tych trzech wielkości:

- natężenie przepływu q zdefiniowane jako liczba pojazdów n zaobserwowanych przez nieruchomego obserwatora stojącego przy drodze w określonym przedziale czasu Δt , podzielona przez długość tego przedziału:

$$q = \frac{n}{\Delta t}$$

- gęstość k zdefiniowana jako liczba pojazdów n przebywająca na odcinku l w określonym momencie:

$$k = \frac{n}{l}$$

- prędkość v zdefiniowano jako iloraz przemieszczenia i czasu:

$$v = \frac{l}{\Delta t}$$

$$\rightarrow v = \frac{q}{k} \text{ z a) i b)}$$

- zmienne te są funkcjami czasu i położenia $q(t,x)$, $k(t,x)$, $v(t,x)$

Diagram fundamentalny

Diagram fundamentalny to podstawowa funkcjonalna zależność między powyższymi zmiennymi. Jego istnienie udokumentowa-

ne jest empirycznie (Rys. 5), występują różne warianty zapisu (liniowy, lub paraboliczny; dwufazowy, lub trójfazowy).

Diagram fundamentalny opisuje wszystkie możliwe stany (w sensie wartości trzech podstawowych zmiennych). Wśród parametrów diagramu można wyróżnić: a) parametry drogi (liczba pasów, prędkość swobodna, ograniczenia, itp.), b) parametry użytkowników (np. średni dystans pomiędzy pojazdami wyrażony w wypukłości paraboli po obu stronach diagramu). Diagram fundamentalny zakłada jednakowe zachowanie kierowców przy takich samych warunkach (choć uwzględnia możliwość podziału na klasy pojazdów), należy go więc traktować jako makroskopowe przybliżenie rzeczywistości.

Diagram fundamentalny (Rys. 4) opisuje punktowy stan sieci. Nie ma tu informacji o tym jak wartości zmieniają się w czasie i w przestrzeni.

Prawo zachowania przepływu

Na pytanie jak opisać przestrzenną i czasową zmianę podstawowych zmiennych (zmiennosc prędkości i gęstości po położeniu dx i po czasie dt) odpowiada prawo zachowania przepływu [4]. Podstawą tu jest skumulowana wartość przepływu $N(x,t)$ interpretowana jako „kolejny numer ostatniego pojazdu który przejechał przez punkt w przestrzeni x nie później niż w czasie t ”.

N jest skokową funkcją czasu i przestrzeni (przyjmuje wartości całkowite), a jej pochodne cząstkowe (po zamianie funkcji skokowej na funkcje ciągłą różniczkowalną) można interpretować kolejno jako:

- przepływ to zmiana skumulowanej liczby pojazdów w czasie

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = q(x,t)$$

- gęstość to zmiana skumulowanej liczby pojazdów w przestrzeni (z ujemnym znakiem)

$$-\frac{\partial N(x,t)}{\partial x} = k(x,t)$$

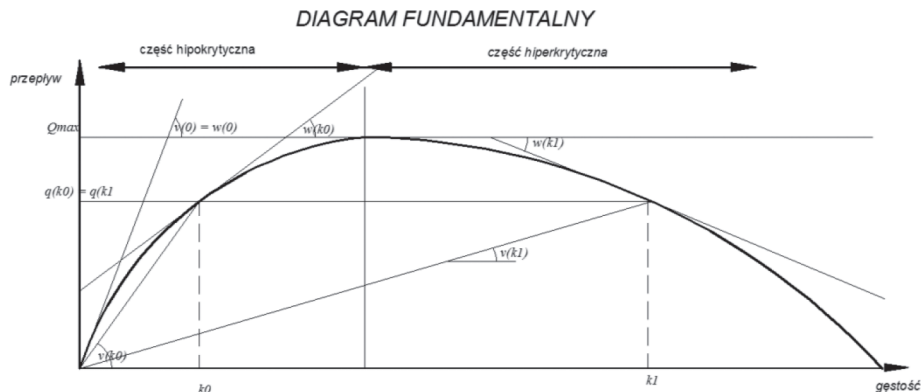
Powyższe równania po zastosowaniu prawa Greena („dwukrotne różniczkowanie da ten sam wynik niezależnie od kolejności różniczkowania”) dają następujące prawo zachowania przepływu:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

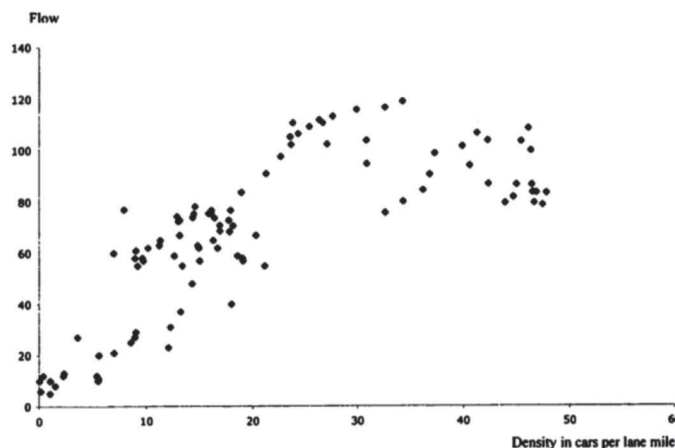
Dzięki temu równaniu punktowy diagram fundamentalny można rozszerzyć i opisać nim zarówno ewolucję i zależności między przepływami w czasie i w przestrzeni.

Teoria fal kinematycznych

Teoria fal kinematycznych rozszerza podstawowy diagram fundamentalny do zmien-



4. Diagram fundamentalny - teoretyczny



5. Empiryczny diagram fundamentalny – empiryczny (Das & Levinson, 2004)

nego stanu sieci: $q(k)$ według [4] można równie dobrze zapisać jako $q(x,t)$, i prawdziwe będzie, że $q(x,t) = q(k(x,t))$. Jeśli do prawa zachowania przepływu podstawimy powyższe q , otrzymamy:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{dq(k(x,t))}{dk} \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0$$

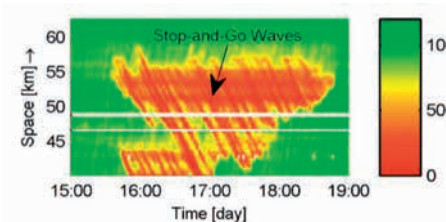
Rozwiązaniem tego równania są linie proste w czasoprzestrzeni, które na fundamentalnym diagramie mogą być interpretowane jako pochodna diagramu fundamentalnego dla zadanej gęstości (dokładnie gradient w czasoprzestrzeni). Wartość ta nazywana jest falą propagacyjną (w na diagramie fundamentalnym) i porusza się ona: a) w kierunku jazdy dla warunków hipokrytycznych; b) w kierunku przeciwnym dla warunków hiperkritycznych (po przekroczeniu gęstości odpowiadającej maksymalnemu przepływowi Q_{max}).

Rozwinięcia Newell’a

Podstawowe założenia teorii przepływu podano powyżej, natomiast [3] dokonał istotnych rozwinięć pozwalających opisać w praktyce wiele zjawisk. I tak:

- fala powstająca w wyniku zderzenia dwu fal propagacyjnych, to tzw. fala uderzeniowa (*shockwave*), ma ona prędkość:

$$v = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2}$$



6. Empiryczny Przykład fali propagacyjnej poruszającej się w przeciwnym kierunku do ruchu [Wageningen-kessels(2010)]

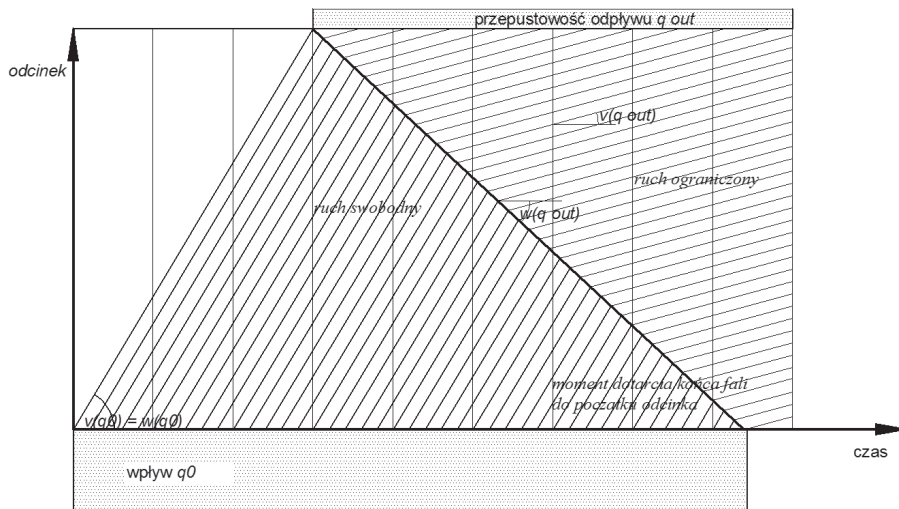
- jeśli dany punkt czasoprzestrzeni opisany jest przez więcej niż jeden możliwy stan (nakładanie się fal), wówczas stan sieci opisany jest funkcją o najmniejszym skumulowanym przepływie N (*lower-ensemble*)

Efekty

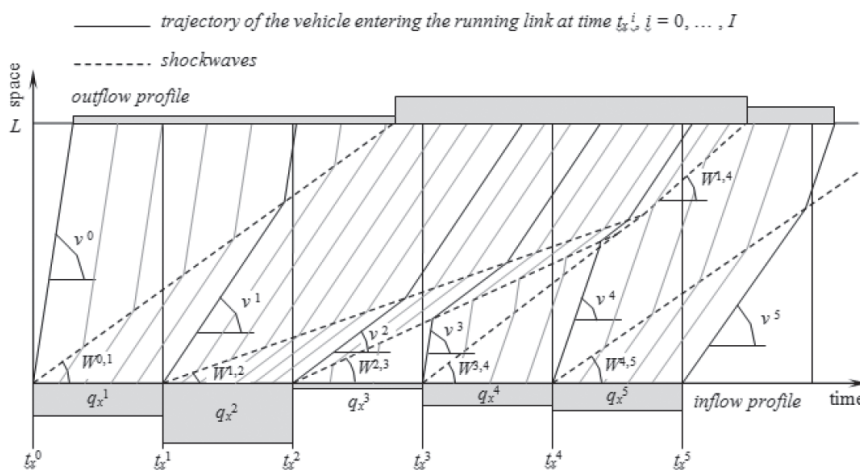
Efektom GLTM jest określenie wartości trzech podstawowych zmiennych dla każdego elementu, dla każdego jego punktu, dla każdej chwili czasu. W praktyce wystarczające jest podanie wartości na wlocie i wylocie odcinka w określonych oknach czasowych (co 5 sekund).

Pełen model GLTM w rzeczywistości składa się z dwu podstawowych komponentów: model odcinków i model węzłów – tutaj (z braku miejsca) opisano jedynie model odcinków.

WYKORZYSTANIE POJEMNOŚCI ODCINKA



7. Obciążenie odcinka o ograniczonym odpływie – wykres czasoprzestrzenny (źródło własne)



8. Zmienny dopływ odcinka, uwzględnienie fal uderzeniowych – wykres czasoprzestrzenny [Gentile (2009)]

Model taki rozwiązywany jest sekwencyjnie w kolejności czasu symulacji (okno po oknie), przy czym spełniony musi być warunek, że najkrótszy czas przejazdu odcinka w sieci jest większy niż okno czasowe (warunek Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego). W pierwszym kroku określone są przepływy odcinków, w drugim węzłów. Procedura jest sekwencyjna i nie wymaga iteracji, w przeciwieństwie do map dynamicznego obciążania sieci, które wymagają procedury iteracyjnej do uzyskania zgodności czasów przejazdu i przepływów.

Przykładowy wynik dla pojedynczego odcinka

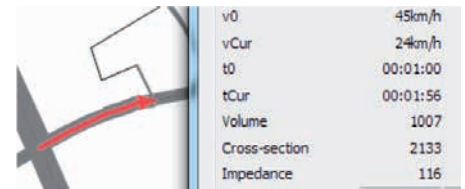
Na Rys. 7 pokazano podstawowy wynik działania modelu. Jest to wykres czasoprzestrzenny dla jednego odcinka. Homogeniczny odcinek (o jednakowych parametrach) obciążony jest stałym wpływem q_0 , który przemieszcza się z prędkością $v_0 = v(q_0)$ (założono tu nierealistyczne uproszcze-

nie: liniowy diagram fundamentalny, fala propagacyjna ma prędkość równą prędkości przepływu $w_0 = v_0$). Przepustowość odpływu jest mniejsza niż wpływ $q_{out} < q_0$. Od końca do początku odcinka biegnie fala propagacyjna z prędkością $w(q_{out})$, po jej przekroczeniu w czasoprzestrzeni jazdy zwalniają: prędkość spada do $v(q_{out})$. Po upływie czasu $l/w(q_{out})$ odcinek jest wypełniony pojazdami – kolejka zaczyna się rozlewać.

Na Rys. 8 pokazano bardziej złożoną sytuację: wpływ i odpływ są zmienne, oraz uwzględniono fale uderzeniowe.

Porównanie z wynikami makrosymulacji

Przeprowadzono dwie symulacje na sieci Krakowa. Pierwszą tradycyjną metodą makrosymulacyjną, drugą w modelu dynamicznym z użyciem GLTM. Celowo zwiększono popyt, by wygenerować zatłoczenie. Ciekawe zjawisko zaobserwowano na moście Grunwaldzkim:



9. Wyniki makrosymulacji

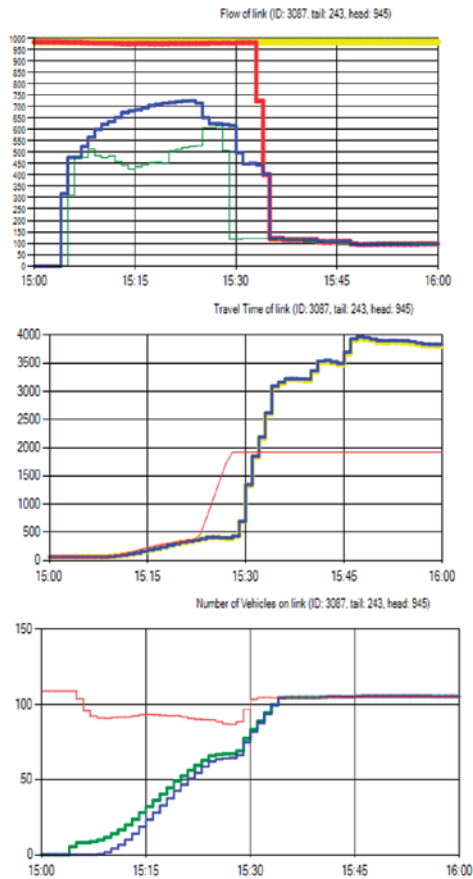
- w wynikach makrosymulacji (Rys. 9) otrzymano nieznaczne przekroczenie przepustowości (107%), prędkość spadła z 45 do 24 km/h, czas przejazdu wzrósł dwukrotnie.
- w wynikach GLTM dla tej samej sieci i takiego samego popytu uzyskano następujący opis (Rys. 10): w okolicach połowy czasu symulacji pojemność odcinka została wyczerpana, kolejka „wylała się” poza odcinek. Przepływ wówczas gwałtownie spadł, a czasy przejazdu wydłużyły się (sieć była nieprzejezdna). Przepustowość spadła z 1000 do 100 pojazdów (około pojemności odcinka wyrażonej w samochodach osobowych).

Porównanie z wynikami mikrosymulacji

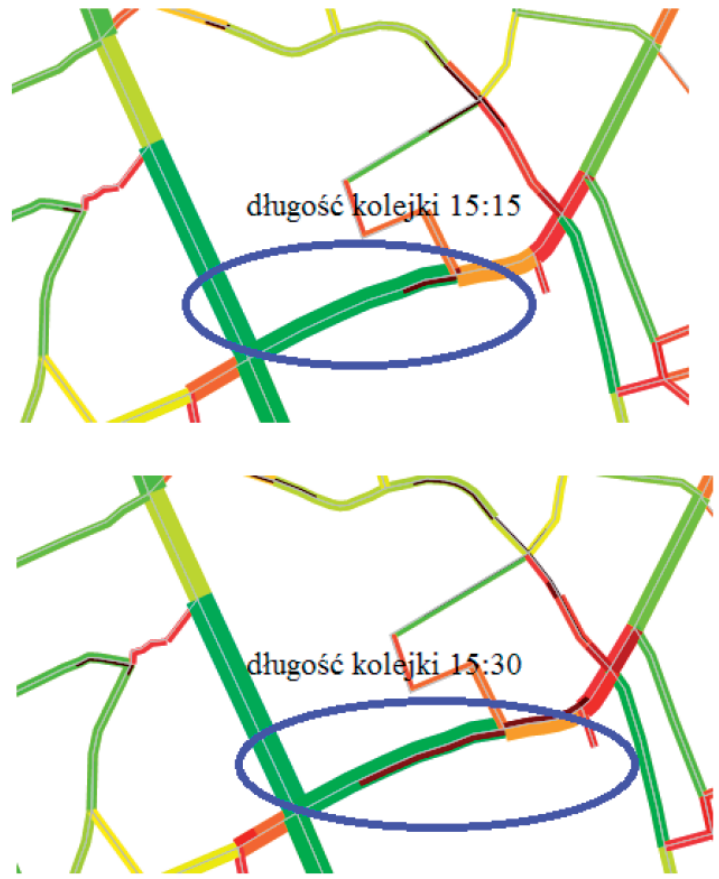
W porównaniu z mikrosymulacją GLTM daje wyniki a) porównywalne, b) stabilne. Na Rys. 12 i Rys. 13 porównano wyniki (Gentile, Tiddi, wyniki robocze niepublikowane). Widać znacznie większą losowość wyników mikrosymulacji – przy takich samych warunkach wejściowych otrzymano bardzo różne wyniki mikrosymulacji.

Podsumowanie

W referacie pokazano alternatywne podejście do modelowania przepływów w sieci. Opisano teoretycznie i praktycznie model, który może dać pełny opis stanu sieci przy krótkim czasie obliczeń. Nie wymaga on długotrwałych symulacji i daje wyniki analityczne. Oparty jest o stosunkowo prostą teorię, która zweryfikowana i rozwijana jest dziesiątkami eksperymentów przeprowadzanych przez ostatnie kilkadziesiąt lat. GLTM pozwala modelować zjawiska zatłoczenia, efektów sygnalizacji świetlnej, rozlewania się kolejek, itp. Model taki wymaga niewielu danych wejściowych i może być stosunkowo łatwo skalibrowany (trzy, cztery kluczowe parametry). W opinii autora należy podjąć próbę użycia takich modeli w modelach ruchu w Polsce, mogą one dać nową jakość i poszerzyć możliwości modeli ruchu, angażując w ich rozwój szersze grono zainteresowanych. ◀



10. Wyniki modelu GLTM: a) przepływ, b) czas przejazdu c) długość kolejki



11. Formowanie się kolejki (kolor brązowy) [www.sistemait.com]

Materiały źródłowe

[1] Brzeziński A., Waltz A., (1998) Budowa hierarchicznych modeli ruchu w sieciach drogowych, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998

[2] Cascetta, E. (2001) Transportation Systems Engineering: Theory and Methods, Kluwer Academic Publishers.

[3] Daganzo, C.F. (1994a). The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with Hydrodynamic Theory. Transportation Research B 28(4), 269-287.

[4] Daganzo, C.F. (1997) Fundamentals of transportation and traffic operations, Pergamon- Elsevier, Oxford, UK.

[5] Das, S., Levinson, D. (2004). Queuing and

Statistical Analysis of Freeway Bottleneck Formation, Journal of transportation engineering

[6] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M. (1997) Inżynieria Ruchu, WKiŁ

[7] Gentile, G. (2008). The General Link Transmission Model for Dynamic Network Loading and a comparison with the DUE algorithm.

[8] Gentile, G. (2009). Linear User Cost Equilibrium: a new algorithm for traffic assignment,

[9] Greenshields, B.D. (1934) A study of traffic capacity, Proceedings of the highway research board 14, 448-477.

[10] Hoogendoorn, S.P., & Bovy, P.H.L. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. Proceedings of the I MECH

E Part I Journal of Systems & Control in Engineer, 215(4), 283–303.

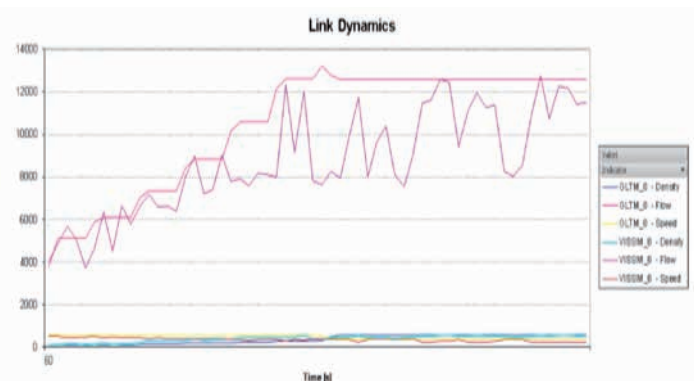
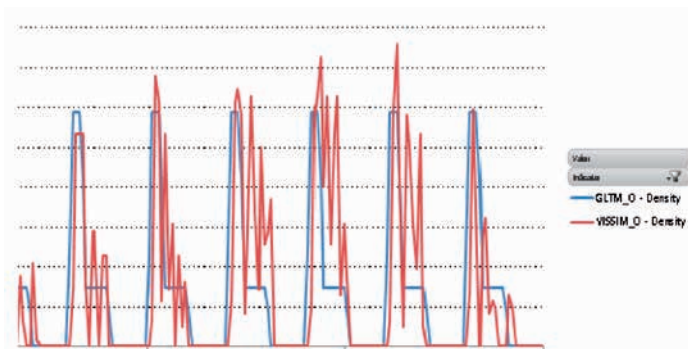
[11] Lighthill, M. J., G. B. Whitham (1955) On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, London: Royal Society.

[12] Newell, G.F. (1993) A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Transportation Research 27B, 281-313.

[13] Prigogine, I., Herman, R., 1971. Kinetic Theory of Traffic Flow. Elsevier, Nowy Jork.

[14] Wageningen-kessels, F. Van, & Schreiter, T. (2010). Modeling Traffic Flow Phenomena, MT ITS Leuven – proceedings

[15] Yperman I. (2007) The Link Transmission Model for dynamic network loading, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.



12. Wykres zmienności gęstości w GLTM (niebieski) i mikrosymulacji (bordowy) 13. Wykres przepływu w GLTM (różowy), oraz w mikrosymulacji (fioletowy)