

## MODELOWANIE ZJAWISKA ZMIANY TRASY PRZEJAZDU W DYNAMICZNYM ROZKŁADZIE RUCHU W SIECI DROGOWEJ<sup>1</sup>

---

**Rafał Kucharski**

mgr inż., Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155, Kraków, tel.: + 48 12 628 2326, e-mail: rkucharski@pk.edu.pl

**Guido Gentile**

prof., Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Rzym, Włochy

---

*Streszczenie. W artykule omówiono problem modelowania stanu sieci drogowej w następnym stanie sytuacji nietypowych, w szczególności w następstwie zdarzeń nieoczekiwanych (wypadków). Pokazano trudności jakie pojawiają się, gdy w dynamicznym modelu ruchu próbuje się uwzględnić reakcje użytkowników na zdarzenia nieoczekiwane. Zdefiniowano pojęcie 'rerouting', czyli zmianę trasy przejazdu w reakcji na informacje o zdarzeniach nieoczekiwanych i pokazano jak można je uwzględnić w dynamicznym modelu ruchu. Przedstawiono i omówiono istotę dwóch rozwiązań problemu: model przesuwającego się horyzontu, oraz model przyswajania informacji. Artykuł podsumowany jest prezentacją wyników modelu przyswajania informacji.*

*Słowa kluczowe: dynamiczny model ruchu, zdarzenia nieoczekiwane, zmiana trasy przejazdu*

### 1. Problem

Praca dotyczy problemu modelowania zjawiska zmiany ścieżki w reakcji na otrzymane informacje o nieoczekiwanym zdarzeniu drogowym. Wobec braku związłego odpowiednika w języku polskim używa się tu angielskiego sformułowania „rerouting”, przez co rozumiemy zmianę pierwotnie wybranej przez użytkownika ścieżki w następstwie otrzymania informacji o zdarzeniu. Gdy faktyczny stan sieci (czasy i koszty przejazdu) znacząco odbiega od typowego, użytkownik może zareagować zmieniając ścieżkę na bardziej atrakcyjną (o mniejszym koszcie dotarcia do celu). Reprezentacja tego zjawiska jest szczególnie złożona, gdy informacja dociera do użytkownika już po rozpoczęciu podróży.

Nieoczekiwane zdarzenie jest tu definiowane bardzo szeroko jako jakiegokolwiek zdarzenie wpływające na przepływ pojazdów w sieci. Może to być np. wypadek, zwężenie, zamknięcie, przebudowa ulicy, demonstracja, impreza sportowa, itd. Precyzyjną definicję zdarzeń o których tu mowa podaje [8]. W literaturze zjawi-

---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Kucharski R. 50%, Gentile G. 50%

ska o którym tu mowa nazywane jest również: en-route rerouting (Snowdon i in., 2012), adaptation [9], warto podkreślić, że niniejsza praca nie dotyczy bliźniaczego problemu zmiany ścieżki przed rozpoczęciem podróży (route-swapping). Jak zostanie pokazane poniżej, obecnie dostępne metody i narzędzia modelowania ruchu nie są w stanie uchwycić zjawiska re-routing i zamodelować go realistycznie.

Paradoksalnie to, co uznawane jest za normalny stan miejskiej sieci transportowej, nie występuje często. Przeciwnie: częściej występującym stanem sieci transportowej jest stan w następstwie nieoczekiwanego zdarzenia powodującego utrudnienia w ruchu. Według danych Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji w Krakowie w 2012 roku miało miejsce w prawie 9000 zdarzeń, co daje średnio 30 zdarzeń w typowym dniu roboczym [4]. W związku z tym koniecznością wydaje się umiejętność opisu stanu sieci w sytuacji nietypowej. Odpowiednim narzędziem wspomagającym podejmowanie decyzji w sytuacjach nietypowych jest model ruchu pokazujący aktualne i prognozowane przepływy potoków w sieci. W niniejszym artykule pokazano możliwości budowy modelu uwzględniającego reakcje użytkowników na sytuacje nietypowe.

## 2. Modelowanie procesów dynamicznych w sieciach transportowych

Zjawiska zachodzące w miejskiej sieci transportowej mają dynamiczną naturę: zarówno potoki pojazdów jak i warunki ruchu zmieniają się w czasie (np. w ciągu doby). Właśnie dlatego metody dynamicznego rozkładu ruchu (Dynamic Traffic Assignment - DTA) zyskują popularność i coraz częściej są stosowane do modelowania przemieszczeń w miastach. W odróżnieniu do metod statycznych są one w stanie pokazać dynamikę stanów sieci, dostarczając rezultatów w formie zmienności w czasie przepływu pojazdów. DTA uwzględnia dynamiczną zmianę stanów sieci: narastające kolejki, zmieniający się czas przejazdu, blokowanie przejazdu przez relacje nadrzędne, „rozlewanie” się kolejek na inne odcinki, itp. – modele statyczne nie dostarczają takich informacji. Dynamika ujęta jest zarówno w formie zjawisk fizycznie obserwowalnych w sieci transportowej (zmienność czasu przejazdu, prędkości, długości kolejki), jak i po stronie popytu (większy w godzinach szczytu).

Najnowsze osiągnięcia pozwalają stosować DTA w rzeczywistych problemach – dla sieci dużych metropolii (np. takich jak Kraków). Dzięki bardzo znacznemu zmniejszeniu czasu obliczeń (np. [10]) zwiększyły się możliwości zastosowania dynamicznych modeli ruchu. Poza klasycznym zastosowaniem do celów strategicznych (np. symulacja i testowanie proponowanych wariantów) pojawiła się możliwość zastosowania operacyjnego w czasie rzeczywistym, np. w centrach zarządzania ruchem [17]. Jednak użycie dostępnych modeli dynamicznych do działania operacyjnego w czasie rzeczywistym wiąże się z szeregiem problemów związanych np. ze zbieraniem i wykorzystaniem danych rzeczywistych, ograniczonym czasem obliczeń, przekazywaniem informacji użytkownikom, uwzględnieniem zjawisk lo-

sowych, itd. Niniejszy artykuł dotyczy jednego z nich: rozszerzenia modelu popytu tak, by reprezentował nie tylko typowy dzień, ale również sytuacje nietypowe, w szczególności nieoczekiwane zdarzenia.

### 3. Dotychczasowy stan wiedzy

Ogólnym celem DTA jest określenie przepływu ruchu w sieci i warunków ruchu związanych z tym przepływem, zachowując przy tym wielkości przepływów określone na poziomie więźby ruchu. DTA rozwiązywane jest metodami rozkładu ruchu na sieć – zazwyczaj wykorzystującego koncepcje równowagi w sieci, gdzie koszty wszystkich użytkowników są zrównoważone [19]. W ujęciu dynamicznym równowaga według Wardopa (Dynamic User Equilibrium – DUE) jest rozumiane jako stan, w którym żaden z użytkowników nie znajduje lepszej alternatywnej trasy, ani czasu rozpoczęcia podróży. Stan ten numerycznie osiągany jest przez rozwiązanie problemu iteracyjnego, zazwyczaj opisanego w formie problemu punktu stałego - kontrakcji [1]. W procesie tym wybory użytkowników (ścieżki i czas rozpoczęcia podróży) są modyfikowane na podstawie kosztów uzyskanych w wyniku decyzji podjętych w poprzedniej iteracji.

Nieoczekiwane zdarzenia wpływają zarówno na podaż jak i na popyt w sieci transportowej. Perturbacje po stronie podażowej (sieć transportowa) pojawiają się nie tylko w miejscu nieoczekiwanego zdarzenia, ale również w pozostałych częściach sieci: przed miejscem zdarzenia (w formie kolejek rosnących w przeciwną stronę niż kierunek ruchu) oraz za nim (w formie zmniejszonych potoków wpływających z miejsca zdarzenia) i co istotne zjawiska te są zmienne w czasie (utrudnienia zaczynają się w momencie zdarzenia i zazwyczaj zwiększają się w czasie). Przy założeniu niezmiennego popytu zjawiska po stronie podażowej można stosunkowo łatwo opisać korzystając z powszechnych modeli przepływu, jak pokazał to Corthout i inni [5].

Znacznie trudniej uchwycić zjawisko po stronie popytu (rerouting). Dla zobrazowania problemu warto posłużyć się jedną z definicji rozkładu ruchu, w której jest on definiowany jako proces uczenia w ciągu kolejnych dni, ang. day-to-day [20]. Taka interpretacja pozwala uchwycić istotę problemów przy modelowaniu zjawiska rerouting. W szczególności pozwala ona unaocznic dwa założenia, które wymagają weryfikacji:

- 1) Użytkownicy przy wyborze ścieżki korzystają z wyników poprzedniej iteracji, tzn. znają wyniki uprzednio podjętych decyzji i mogą je weryfikować. W ujęciu „z dnia na dzień” iteracje rozumiane są jako kolejne dni, a modyfikacja jest rozumiana jako uczenie się z doświadczeń dnia poprzedniego. Typowe rozwiązanie problemu DTA to „stan równowagi”, w którym użytkownicy nauczyli się już sieci na tyle dobrze, że są usatysfakcjonowani swoimi decyzjami w takim stopniu, że ich decyzje na kolejny dzień nie będą się różnić od tych z dnia poprzedniego. Takie założenie nie może być

przyjęte dla zdarzeń nieoczekiwanych, gdzie użytkownicy nie mają szansy na przeprowadzenie procesu uczenia się. Zamiast wielu iteracji w których udoskonalane są wybory mamy jedną możliwość podjęcia decyzji przy dużej niewiadomej efektów podejmowanych decyzji.

- 2) Niezmiennność warunków brzegowych. W DTA proces uczenia się oparty jest o założenie, że kolejny dzień będzie identyczny jak dzisiejszy w sensie parametrów sieci i wielkości popytu. Każda kolejna iteracja problemu symulowana jest dla tych samych parametrów sieci i tej samej więźby ruchu. Wobec tego DUE jest odpowiednim narzędziem do uzyskania stanu sieci dla jakiegokolwiek powtarzalnego i przewidywalnego dnia (np. typowy dzień roboczy, typowy słoneczny letni piątek, typowy dzień świąteczny) dla którego użytkownicy mieli szansę nauczyć się swoich zachowań (dzień ten powtarzał się). Ponadto nawet jeśli w danym typowym dniu rzeczywiste warunki odbiegają od typowych, zachowanie użytkowników (ścieżki) nie zmienia się dopóki użytkownicy nie otrzymają informacji, że faktyczne warunki ruchu różnią się od typowych. To założenie również nie może być przyjęte dla sytuacji nietypowych, gdzie nieoczekiwane zdarzenia z definicji wpływają na parametry sieci (np. zmniejszenie przepustowości). Proponowane rozwiązanie musi uwzględniać powyższe problemy i proponować alternatywne podejście zgodne z zachowaniem użytkowników w sytuacjach nietypowych.

#### 4. Podstawy teoretyczne

Zaproponowane rozwiązania w istocie są rozszerzeniem algorytmu DTA pozwalającym uchwycić zjawisko zmiany ścieżki w trakcie podróżowania. Obydwa proponowane modele są zintegrowane z algorytmem DTA i rozwiązywane wspólnie. W ramach prac przyjęto dwa cele: 1) algorytm powinien realistycznie reprezentować zjawisko 2) jego implementacja powinna być praktycznie użyteczna – możliwa do obliczenia dla rzeczywistych sieci w akceptowalnym czasie.

W pracach zastosowano makroskopowe ujęcie DTA zaproponowane w [2]. DTA jest tam dzielone na dwie części: popyt będący funkcją podaży i podaż będącą funkcją popytu. Część popytowa oblicza ścieżki na podstawie kosztów i czasów przejazdu uzyskanych w modelu podaży. Podczas gdy część podażowa określa koszty i czasy przejazdu dla potoków (zagregowanych ścieżek) uzyskanych w modelu popytu. W pracy skorzystano z aktualnej wersji algorytmu zgodnie z definicją podaną w [11]. Wykorzystany model popytu oparty jest o model sekwencyjny [12], będący rozwinięciem probabilistycznego algorytmu Diala [6] z logitowym modelem wyboru ścieżki [3]. Podaż modelowana jest uogólnionym modelem przepływu [14] z pełną aktualną definicją podaną w [13]. Praca skupia się na części popytowej DTA, w szczególności na modelu wyboru ścieżki (Route Choice Model - RCM) i modelu propagacji (Network Flow Propagation - NFP), model podaży nie jest przedmiotem analizy w niniejszej pracy. Jako, że analizy są prowadzone

w ujęciu dynamicznym, wszystkie zmienne modelu są szeregami czasowymi, reprezentowanymi przez przedziałami liniowe funkcje klasy  $C^1$ .

#### 4.1. Notacja

$G(N, A)$	spójny, graf zorientowany składający się z łuków $a \in A$ , węzłów $i \in N$ , i centroid $o$ , $d \in N$ ,
$a^-, a^+$	węzeł początkowy i końcowy łuku $a$ ,
$i^-, i^+$	zbiór następników i poprzedników węzła $i$ ,
$i^-_a, i^+_a$	zbiór efektywnych następników i poprzedników węzła $i$ dla dotarcia do celu $d$ ,
$\tau$	czas, zmienna czasu szeregu czasowego,
$\theta$	czas w odniesieniu do trajektorii (czas dotarcia do celu $d$ ),
$\delta_a(\tau)$	parametry łuku $a$ w czasie $\tau$ (prędkość, przepustowość itp.),
$t_a(\tau)$	czas przejazdu łuku $a$ dla użytkowników wjeżdżających na niego w chwili czasu $\tau$ ,
$c_a(\tau)$	koszt przejazdu łuku $a$ dla użytkowników wjeżdżających na niego w czasie $\tau$ ,
$p_{ad}(\tau)$	warunkowe prawdopodobieństwo wyboru następnika – p-stwo kontynuowania podróży po łuku $a$ pod warunkiem znajdowania się na jego ogonie w czasie $\tau$ i podróżowania do celu $d$ ,
$p_a(\tau)$	bezw warunkowe prawdopodobieństwo wyboru następnika – p-stwo kontynuowania podróży po łuku $a$ pod warunkiem znajdowania się na jego ogonie w czasie $\tau$ ,
$q_{ad}(\tau)$	potok wpływający do łuku $a$ w czasie $\tau$ dla użytkowników podróżujących do celu $d$ ,
$q_a(\tau)$	całkowity potok wpływający do łuku $a$ w czasie $\tau$ ,
$q_o(\tau)$	całkowity potok wypływający z centroidy $o$ w czasie $\tau$ ,
$g_{ad}(\theta)$	minimalny koszt dotarcia z łuku $a$ do celu $d$ o czasie $\theta$ ,
$b_{ad}(\theta)$	maksymalny czas wyjazdu z łuku $a \in A$ aby dotrzeć do celu $d \in D$ o czasie $\theta$ ,
$w_{id}(\theta)$	satysfakcja na węźle $i \in N$ dla dotarcia do celu $d \in D$ o czasie $\theta$ obliczona według wzoru (1),
$\eta$	parametr skali modelu logitowego, zastosowany we wzorze (2).

#### 4.2. Bazowy algorytm DTA

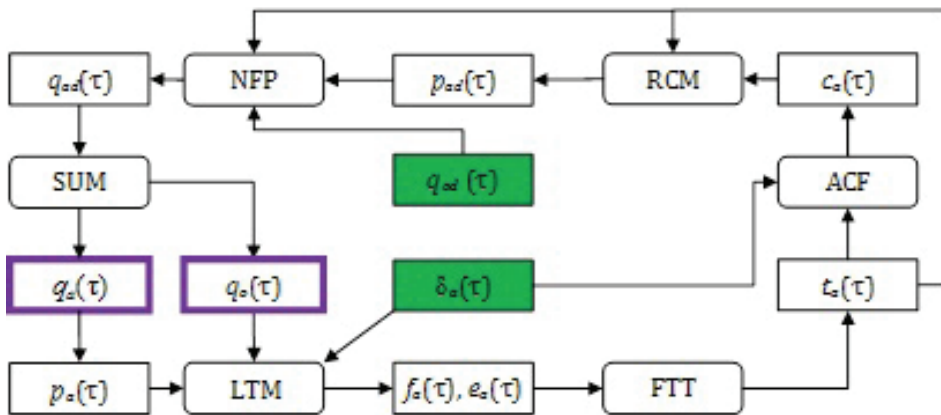
Poniżej zdefiniowano zastosowany algorytm DTA jako zbiór modeli częściowych oraz schemat zależności między nimi:

- Link Transmission Model (LTM) – model zjawisk zachodzących w sieci transportowej, oblicza warunki przepływu potoków ruchu (wpływy  $f_a(\tau)$  i odpływy  $e_a(\tau)$ ) w sieci jako funkcję potoków  $q_a(\tau)$  obliczonych w modelu popytu.

- First-in-first-out Travel Time (FTT) –model dodatkowy, który oblicza czasy przejazdu  $t_a(\tau)$  na podstawie wpływów  $f_a(\tau)$  i odpływów  $e_a(\tau)$  uzyskanych w LTM.
- Arc Cost Function (ACF) –funkcja obliczająca koszty przejazdu odcinka  $c_a(\tau)$  na podstawie potoków  $f_a(\tau)$ .
- Route Choice Model (RCM) – model wyboru ścieżki opisany poniżej.
- Network Flow Propagation (NFP) – model propagacji potoków w sieci. Propaguje potoki  $q_{ad}(\tau)$  ze wszystkich źródeł o do jednego celu  $d$  korzystając z prawdopodobieństw warunkowych  $p_{ad}(\tau)$  uzyskanych w RCM.
- Aggregation (SUM) – model agregacji potoków  $q_{ad}(\tau)$  podzielonych na cele  $d$  do potoków całkowitych  $q_a(\tau)$  i wyliczenia bezwzględnych prawdopodobieństw wyboru następnika  $p_a(\tau)$  (bez podziału na cel).

Powyższe modele cząstkowej oblicza się sekwencyjnie w następującej kolejności, która jest następnie zapętlniana do postaci problem punktu stałego rozwiązywanego iteracyjnie aż do momentu osiągnięcia stabilizacji (equilibrium):

DTA = ...  $\rightarrow$  LTM  $\rightarrow$  FTT  $\rightarrow$  ACF  $\rightarrow$  RCM  $\rightarrow$  NFP  $\rightarrow$  SUM  $\rightarrow$  LTM  $\rightarrow$  (FTT  $\rightarrow$  ...)



Rys. 1. Schemat algorytmu problemu punktu stałego DTA

#### 4.2.1. Model wyboru ścieżki (RCM)

Kluczowym elementem proponowanych rozwiązań problem jest model wyboru ścieżki (RCM – [12]). Obydwa z proponowanych rozwiązań opierają się na modyfikacjach bazowego RCM opisanego poniżej.

RCM wykonywany jest zgodnie z kolejnością topologiczną  $TO_d(\theta)$  (od celu do najdalszego węzła) kolejno dla każdego celu  $d$  i dla każdego momentu czasu  $\theta$ . RCM rozpoczyna się od obliczenia najkrótszego drzewa rozpinającego [7] dla dostarczenia do celu  $d$  o czasie  $\theta$  (dzięki temu otrzymujemy minimalny koszt i czas dojazdu do celu:  $g_{id}(\theta), h_{id}(\theta)$ ). Otrzymane drzewo poddawane jest dwóm przejściom algorytmu. W pierwszym przejściu (od celu do źródeł) obliczane są wartości satysfakcji dla każdego węzła  $w_{id}(\theta)$  dane następującym równaniem:

$$w_{id}(\theta) = \begin{cases} \sum_{a \in i_d^+} \exp\left(\frac{-c_a(h_{a^-d}(\theta))}{\eta}\right) w_{a^+d}(\theta) \sqrt{\frac{g_{a^+d}(\theta)}{g_{id}(\theta)}} & i \neq d \\ 1 & i = d \end{cases} \quad (1)$$

Satysfakcje węzłów są użyte w trakcie drugiego przejścia, wykonanego w odwrotnej kolejności (od najdalszego źródła do celu) gdzie obliczane są prawdopodobieństwa warunkowe zgodnie z następującym wzorem logitowym:

$$p_{ad}(\theta) = \begin{cases} \frac{\exp\left(\frac{-c_a(h_{a^-d}(\theta))}{\eta}\right) w_{a^+d}(\theta) \sqrt{\frac{g_{a^+d}(\theta)}{g_{a^-d}(\theta)}}}{w_{a^-d}(\theta)} & a \in (a^-)_d^+ \\ 0 & a \notin (a^-)_d^+ \end{cases} \quad (2)$$

Drugie przejście najkrótszego drzewa może być łatwo zintegrowane z modelem propagacji, gdzie potoki są propagowane do celu  $d$  zgodnie z obliczonymi prawdopodobieństwami warunkowymi:

$$q_{id}(\theta) = \begin{cases} q_{id}(\theta) + \sum_{a \in i_d^-} q_{a^-d}(\theta) p_{ad}(\theta) & i \in O \\ \sum_{a \in i_d^-} q_{a^-d}(\theta) p_{ad}(\theta) & i \notin O \end{cases} \quad (3)$$

Dzięki temu model wyboru ścieżki i model propagacji są wykonane w jednej procedurze.

### 5. Rozwiązania problemu

Autorzy proponują dwa rozwiązania przedstawione tutaj w skróconej formie. Rozwiązania mają różne zastosowania i różnią się dokładnością. Pierwsze [11] jest uproszczeniem, które pozwala obliczać efekty wielu zdarzeń w czasie rzeczywistym kosztem uproszczenia opisu zjawiska. Drugie [15] jest bardziej realistyczne, ale pozwala uwzględnić jedynie pojedyncze zdarzenie. W trakcie opracowywania jest model łączący zalety obydwu rozwiązań.

Badana jest reakcja użytkowników sieci na informacje o zdarzeniu, które utrudni im dotarcie do celu. W szczególności przedmiotem badania jest zachowanie użytkowników w miejskiej sieci transportowej, gdzie użytkownicy są zaznajomieni z siecią i mogą racjonalnie reagować na zdarzenia losowe, zmieniając swoją ścieżkę. Zjawisko badane jest w ujęciu makroskopowym, gdzie określone są potoki przepływające przez sieć, a nie pojedynczy użytkownicy. W związku z tym obiektem badania jest sieć makroskopowa i jej stan, czyli określenie przemieszczania

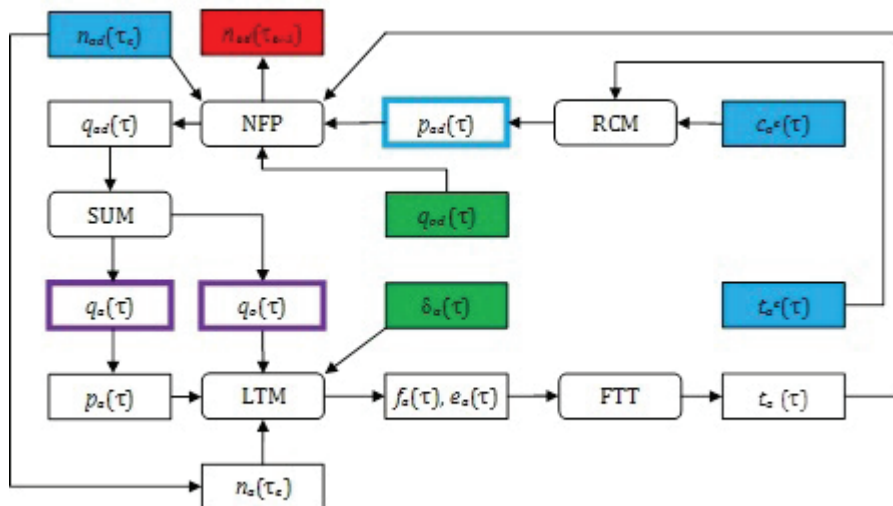


się potoków ruchu przez sieć w czasie. W szczególności zaś badana będzie różnica pomiędzy stanem sieci w sytuacji gdy nie ma incydentów a sytuacją z incydemtem.

### 5.1. Model przesuwanego się horyzontu

Model przesuwanego się horyzontu czasu, gdzie każdy kolejny obliczony horyzont oznacza nowy zbiór informacji o zdarzeniach nieoczekiwanych. Model jest sekwencją kolejnych rozwiązań klasycznego problemu DTA (zdefiniowanego na schemacie powyżej), został opublikowany przez Gentile, Kucharskiego i Meschini'ego (2013). Dla każdego zdarzenia obliczane jest nowe rozwiązanie DTA (rozwiązanie problemu punktu stałego według 4.2.1) wykorzystujące wyniki rozwiązania poprzedniego. Każde rozwiązanie rozpoczyna się w momencie zakomunikowania nowego zdarzenia  $\tau_e$ . Wykorzystuje ono wyniki poprzedniego rozwiązania (zapisane w formie potoków na odcinkach w chwili zdarzenia  $n_{ad}(\tau_e)$ ) i oblicza nowe ścieżki przy założeniu, że określona (stała) część użytkowników otrzymała informacje o zdarzeniu. Nowe ścieżki (zapisane i zagregowane w formie  $p_{ad}(\tau)$ ) są użyte w modelu propagacji ruchu przez sieć. W efekcie ruch przepływa przez sieć zgodnie z dwoma różnymi modelami popytu: przed informacją o zdarzeniu i po informacji o zdarzeniu.

Model pokazano na schemacie (rys. 2), będącym rozszerzeniem podstawowego schematu z rys. 1. Zasadnicza zmiana odbywa się na poziomie NFP, gdzie dodatkowo zapisywana i następnie wykorzystywana jest informacja o liczbie pojazdów na każdym odcinku w chwili informacji o zdarzeniu  $n_{ad}(\tau)$  (w podziale na cel podróży  $d$ , który jest istotny w modelu wyboru ścieżki).



Rys. 2. Schemat modelu przesuwanego się horyzontu (pojedyncza symulacja)

Model przesuwanego się horyzontu można streścić jako propagacja popytu wzdłuż typowych ścieżek aż do momentu otrzymania informacji o zdarzeniu. Po



otrzymaniu informacji określona część popytu wyznaczy na nowo swoje ścieżki od miejsca otrzymania informacji do celu podróży. Użytkownicy dla których wpływ zdarzenia (opóźnienie) jest duże, wybiorą inne ścieżki dotarcia do celu niż typowe. Od momentu otrzymania informacji popyt propagowany jest do celu wzdłuż zaktualizowanych ścieżek (prawdopodobieństw warunkowych  $p_{ad}(\tau)$ ), z których część może być inna niż typowe (te wybrane w momencie rozpoczynania podróży). Model ten może być obliczony dla dowolnej sekwencji zdarzeń napływających w czasie rzeczywistym, jest on zaprojektowany z myślą o szybkiej reakcji i jak najszybszym dostarczeniu informacji do centrum sterowania ruchem.

### 5.2. Model przyswajania informacji

W opisanym powyżej modelu przesuwającego się horyzontu zjawisko jest reprezentowane w sposób uproszczony, pomija się niektóre rzeczywiste zachowania użytkowników i procesy zachodzące w sieci w sytuacji nieoczekiwanych zdarzeń. Pominięte są np. aspekty potencjalnych zysków ze zmiany ścieżki, dostępu do informacji, niechęci do zmiany, itd. Dlatego dla pojedynczego zdarzenia proponuje się model przyswajania informacji (Information Comply Model – ICM) [15].

Model ICM rozwiązuje problem artykułu stawiając następujące pytanie: „*Jak użytkownicy zmieniają ścieżki po otrzymaniu informacji o nieoczekiwanym zdarzeniu?*”. Które zostaje rozbite na następujące trzy części: „*kiedy?*”, „*dłaczego?*” i „*na jaką? zmieniata jest ścieżka?*”. ICM odpowiada na to następująco:

- *kiedy?* Po otrzymaniu informacji,
- *dłaczego?* Aby uniknąć negatywnych konsekwencji i zminimalizować czas dotarcia do celu,
- *na jaką?* Użytkownik zmienia ścieżkę na optymalną w świetle swoich oczekiwań i otrzymanych informacji.

Dla zapewnienia realistyczności modelu uwzględnione zostały następujące zależności:

- 1) Informacja rozprzestrzenia się w czasie, docierając do coraz większej liczby użytkowników.
- 2) Bliższe zdarzenia mają większy wpływ na zmianę ścieżki.
- 3) Im większe opóźnienie w dotarciu do celu spowodowane zdarzeniem tym większe prawdopodobieństwo zmiany ścieżki.
- 4) Nawet gdy użytkownik nie otrzyma informacji o zdarzeniu, może na podstawie obserwacji domyśleć się jego wystąpienia.

Wyniki modelu ICM są zgodne z powyższymi zależnościami. Model ten opiera się o różnice pomiędzy typowymi i faktycznymi kosztami i czasami przemieszczania w sieci. Użytkownik dokonuje wyboru ścieżki na podstawie typowych (oczekiwanych) kosztów, gdy faktyczne koszty są inne może on dokonać rewizji wyboru i zmienić trasę. Model ICM składa się z następujących trzech modułów:

$v_{id}(\tau)$       **model rozprzestrzeniania się informacji**,  $v$  jest funkcją czasu, całkowitego wpływu zdarzenia na sieć  $M$  w czasie  $\tau$  i odległości od zdarzenia  $\delta_{id}$ . Model oblicza udział użytkowników w czasie  $\tau$  na węźle

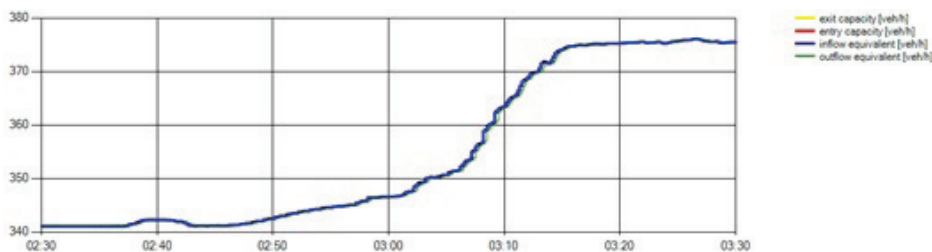
$i$  którzy otrzymali informację o zdarzeniu. Model oparto o obserwacje rozprzestrzeniania się informacji w sieci Twitter [18] przy użyciu rozkładu Rayleigha.

$o_i(\tau)$  **model obserwacji**, który jest funkcją miejsca i czasu. Model ten pokazuje jak skumulowane zaobserwowane opóźnienie  $m_i$  powoduje domyślanie się wystąpienia zdarzenia przez użytkowników. Model określa, jaka część użytkowników w czasie  $\tau$  na węźle  $i$  domniema, że zdarzenie wystąpiło.

$\kappa_{id}(\tau)$  **model przyswajania**, który biorąc pod uwagę potencjalne zyski wynikające ze zmiany ścieżki i potencjalne straty wynikające z pozostania na typowej ścieżce określa jaka część użytkowników faktycznie zmieni ścieżkę. Model ten operuje na różnicach pomiędzy typowymi i rzeczywistymi wartościami: a) satysfakcji  $w_{ad}(\tau)$  na węzłach, oraz b) prawdopodobieństw warunkowych  $p_{ad}(\tau)$ . Model przyswajania wykorzystuje dwumodalny model logitowy.

## 6. Wyniki

Obydwa zaprezentowane powyżej modele zostały zaimplementowane w opisanym środowisku DTA. Ich działanie zostało sprawdzone zarówno na małej testowej sieci obrazującej istotę zjawiska, oraz na rzeczywistej sieci modelu Krakowa. Poniżej pokazano przykładowy wykres zmiany potoku w czasie. Zasymulowano zdarzenie na alei Powstania Warszawskiego w Krakowie i obserwowano używanie przez użytkowników tras alternatywnych. Poniżej pokazano zwiększanie się potoku ruchu na alternatywnym odcinku (ul. Rakowicka). Zdarzenie zasymulowane w przeprowadzonym teście miało miejsce o godzinie 02:30. Po tym czasie informacja dociera do użytkowników i zaczynają oni wybierać trasę alternatywną. W miarę upływu czasu coraz więcej użytkowników otrzymuje informacje, oraz negatywne skutki zdarzenia (kolejki) są coraz większe. Powoduje to wzrost potoku na trasie alternatywnej (o ok. 30 pojazdów) – takie wyniki są niedostępne w klasycznym modelu DTA.



Rys. 3. Stopniowo rosnący potok na trasie alternatywnej – wynik modelu przyswajania informacji

## 6. Podsumowanie

Wyniki pracy mogą być wykorzystane przez modelujących ruch w celu prognozowania wpływu zdarzeń nieoczekiwanych na stan sieci. Zjawiska których wpływ może być modelowany obejmują: wypadki drogowe, czasowe zamknięcia sieci, zmiany planów sygnalizacji, awarie, demonstracje, wydarzenia sportowe, itp.

Warunkiem wykorzystania proponowanych modeli jest posiadanie dynamicznego modelu sieci danego obszaru, który mógłby zostać poszerzony poprzez integrację z proponowanym modelem. Proponowane rozwiązania są zaprojektowane jako dodatki do dotychczas używanych modeli dynamicznych i nie wymagają dodatkowych danych wejściowych. Reprezentacja sieci i popytu pozostają bez zmian. Jednak kalibracja i weryfikacja przedstawionych propozycji wydaje się być problematyczna. Dane o wielkości potoków w sytuacji typowej i w następstwie zdarzeń (np. z pętli indukcyjnych, kamer, czy pomiarów ręcznych) są niewystarczające. Pokazują one jedynie całkowite wielkości zjawiska i ostateczny wpływ na stan sieci, nie dostarczają jednak dokładnej informacji o zmianach trasy. Taka informacja może być uzyskana poprzez analizę trajektorii pojazdów otrzymanych np. z próbek GPS, czy GSM. Wymaga to dużej próby statystycznej, która na dzień dzisiejszy nie jest dostępna. Niemniej jednak proponowane modele są definiowane tak, by możliwa była ich weryfikacja.

Dzięki temu dotychczasowe systemy ITS działające w wielu miastach na świecie (w tym w Polsce i w Krakowie) mogą uzyskać nową funkcjonalność. Po otrzymaniu informacji o zdarzeniu operator systemu uzyska dzięki wynikom zaproponowanych modeli prognozę uwzględniającą spodziewane reakcje użytkowników. Będzie ją mógł wykorzystać i dobrać optymalną metodę sterowania, oraz zweryfikować sposób dostarczenia informacji (np. poprzez znaki zmiennej treści).

## Bibliografia

- [1] Banach S., Sur les opérations dans les ensembles abstraits et leur application aux équations intégrales, *Fund. Math.*, 3133–181, 1922.
- [2] Bellei G., Gentile G., Papola N., A within-day dynamic traffic assignment model for urban road networks. *Transportation Research Part B* 39 (2005), s. 1-29, 2005.
- [3] Ben-Akiva M., Lerman S., *Discrete Choice Analysis*, MIT Press, Cambridge, 1985.
- [4] CEWIK.pl, Centralna Ewidencja Wypadków i Kolizji, 2014.
- [5] Corthout R., Tampère C.M.J., Immers L.H., Marginal Incident Computation: An Efficient Algorithm to Determine Congestion Spillback due to Incidents. *Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, s.1–22, 2009.
- [6] Dial R. B., A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm which Obviates Path Enumeration. *Transportation Research* 5, s.83-111, 1971.

- [7] Dijkstra E. W., Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerical Mathematics*, 1, s.269-271, 1959.
- [8] Dobler C., Travel behaviour modelling for scenarios with exceptional events - methods and implementations, PhD Dissertation ETH Zurich, 2013.
- [9] Gao S., Frejinger E., Ben-Akiva M., Adaptive route choices in risky traffic networks: A prospect theory approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 2010.
- [10] Gentile G., Traffic assignment: can dynamic models offer more? In: *Proceedings of Networks for Mobility, 5th International Symposium, FO-VUS, Stuttgart*, 2010.
- [11] Gentile G., Kucharski R., Tididi D., Splitting rates equilibrium in Dynamic Traffic Assignment using the General Link Transmission Model to simulate network performances, *hEART 2013 - 2nd Symposium of the European Association for Research in Transportation*, 2013.
- [12] Gentile G., Papola A., An alternative approach to route choice simulation: the sequential models, *Proceedings of the European Transport Conference 2006 – ETC 2006*.
- [13] Gentile G., The General Link Transmission Model for Dynamic Network Loading and a comparison with the DUE algorithm. *New developments in transport planning: advances in Dynamic Traffic Assignment (selected papers from the DTA 2008 Conference, Leuven)*, ed.s L.G.H. Immers, C.M.J. Tampere, F. Viti, *Transport Economics, Management and Policy Series*, Edward Elgar Publishing, MA, USA, 2010.
- [14] Kucharski, R., Makroskopowy model przepływu ruchu w sieci drugiego rzędu – alternatywny opis stanu sieci. *Wydajność systemów transportowych, Materiały IX Konferencji naukowo-technicznej*. s. 519-537, 2013.
- [15] Kucharski R., Gentile G., Meschini L., Information Comply Model – New model to represent rerouting phenomena in Dynamic Traffic Assignment. *DTA Conference, Salerno*, 2014.
- [16] Leskovec J., Adamic L., Huberman B., The dynamics of viral marketing. *ACM Transactions on the Web*, 1(1), 2007.
- [17] Meschini L., Gentile G., Real-time traffic monitoring and forecast through OPTIMA, *Proceedings of Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, International Conference Rome*, 2010.
- [18] Procter R., Vis F., Voss A., Reading the riots on Twitter: methodological innovation for the analysis of big data, *International Journal of Social Research Methodology*, Vol. 16, Iss. 3, 2013.
- [19] Wardrop J. G., Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1 (3) s. 325–362, 1952.
- [20] Watling D., Hazelton M., The dynamics and equilibria of day-to-day assignment models. *Networks and Spatial Economics* 3 (3), 349–370, 2003.