

Renata Żochowska¹
Wydział Transportu Politechniki Śląskiej

Modelowanie zachowań podróźnych w warunkach zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich

1. WPROWADZENIE

Gęste sieci miejskie charakteryzują się zarówno dużą koncentracją skrzyżowań na ograniczonym obszarze, jak i znaczną niejednorodnością wielkości potoku ruchu oraz prędkości jego przemieszczania. Może to prowadzić do częstych zakłóceń płynności ruchu pojazdów. Ponadto zmienność warunków ruchu w czasie i przestrzeni wyrażona zróżnicowanymi wartościami stopnia obciążenia poszczególnych elementów sieci miejskiej często powoduje kongestię i wydłużenie czasu podróży, co jest szczególnie dotkliwe w okresach ruchu szczytowego [10, 23, 26, 29, 32]. Sieci miejskie są obszarem, gdzie dochodzi do wielu wzajemnie zależnych zdarzeń. Część z nich może wywołać konieczność zamknięcia poszczególnych jej elementów dla ruchu prowadząc do zakłóceń w funkcjonowaniu całego systemu transportowego miasta. Stąd modelowanie zachowań podróźnych w gęstych sieciach miejskich jest szczególnie złożonym zagadnieniem.

Duża gęstość sieci miejskiej wyrażona liczbą elementów infrastruktury różnego typu przypadających na jednostkę powierzchni powoduje większe możliwości wyboru drogi w porównaniu z innymi typami sieci². W związku z tym potok ruchu przemieszczający się pomiędzy miejscem źródłowym a docelowym jest rozkładany na większą liczbę dróg alternatywnych, a stopień wykorzystania każdej z nich jest często trudny do oszacowania. Wśród podstawowych czynników wpływających na wybór drogi w sieci jako najważniejszy wymienia się tzw. uogólniony koszt przemieszczania [3, 23, 28], którego głównym składnikiem jest czas podróży. Dlatego istotnym problemem przy konstruowaniu modelu dla potrzeb oceny konsekwencji zamknięć elementu sieci drogowej jest określenie wielkości wzrostu czasu podróży zarówno z punktu widzenia całego systemu, jak i poszczególnych podróźnych.

Zakłócenia w sieci miejskiej wywołane kongestią³ mają charakter cykliczny w pewnym horyzoncie czasu i zazwyczaj są typowe dla określonego elementu sieci transportowej. W gęstych sieciach miejskich miejscem powstawania problemów komunikacyjnych są głównie skrzyżowania, skąd zakłócenia przenoszą się na odcinki między skrzyżowaniami i dalej na inne elementy sieci transportowej, prowadząc do zatorów komunikacyjnych [29, 34]. Każde dodatkowe nieoczekiwane zakłócenie wynikające z zamknięcia określonego elementu sieci miejskiej może wywoływać nietypowe zachowania komunikacyjne użytkowników sieci, wynikające z ich dezorientacji i podejmowania często nieracjonalnych decyzji. Dopiero po pewnym czasie adaptacji do nowych warunków ruchu można mówić o nowym stanie równowagi. Stan ten może być ponownie zachwiany przy kolejnej zmianie struktury sieci związanej z zakończeniem zamknięcia.

Jednym z podstawowych elementów sieci miejskiej jest ulica⁴, która stanowi miejsce wspólnego funkcjonowania różnych podsystemów transportowych (np. system transportu indywidualnego, zbiorowego,

¹ renata.zochowska@polsl.pl

² W literaturze spotyka się również inne mierniki gęstości związane np. z poziomem dostępności czy topologią sieci transportowej [24].

³ Przez kongestię należy rozumieć sytuację, której większa liczba nabywców ubiega się o pewne dobro, które nie może być dostarczone w formie oddzielnych jednostek [29]. W systemach transportowych zróżnicowane potrzeby użytkowników konkurują o ograniczoną pojemność elementów sieci drogowej. Istotą kongestii transportowej jest wzajemne oddziaływanie użytkowników na siebie powodujące negatywne skutki eksploatacyjne i ekonomiczne [5].

⁴ Zgodnie z „Ustawą o drogach publicznych” [33] ulica rozumiana jest jako „droga na terenie zabudowy lub przeznaczonym do zabudowy zgodnie z przepisami o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym, w której ciągu może być zlokalizowane torowisko tramwajowe”.

ciężarowego). W związku z tym efekty zakłóceń wynikających z jej zamknięcia mogą wpływać na sprawne działanie każdego z tych podsystemów. Okresowe zamknięcie ulicy dla ruchu może trwać od kilku godzin do kilkunastu miesięcy. Do najczęściej występujących przyczyn zamknięć można zaliczyć m.in.: awarie urządzeń podziemnych lub awarie występujące na obiektach komunikacyjnych, roboty inżynierskie prowadzone w pasie drogi lub w bezpośrednim jej sąsiedztwie oraz imprezy, wymagające wprowadzenia odpowiedniej organizacji ruchu ze względu na wykorzystanie jezdni lub gromadzenie dużej liczby osób w jednym obszarze [7]. Zamknięcie ulicy może być również spowodowane różnego rodzaju zdarzeniami drogowymi (np. wypadki, kolizje drogowe, wyciek oleju, itp.), niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi (np. intensywne opady śniegu, powódzie, osuwiska skalne), złym stanem nawierzchni czy nawet atakami terrorystycznymi⁵. Z punktu widzenia sposobu kształtowania zachowań użytkowników sieci drogowej zamknięcia ulic można podzielić na planowane i nieplanowane⁶. Właściwe modelowanie procesów zachodzących w każdej z tych dwóch sytuacji w systemie transportowym miasta wymaga przyjęcia pewnych odmiennych założeń.

W modelach klasycznych często przyjmuje się, że użytkownicy po wprowadzeniu zmian w strukturze sieci natychmiast dostosowują się do nowej sytuacji i znajdują optymalny alternatywny sposób podróży [21]. Próbę budowy modelu zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich podejmowano m.in. w pracach [41, 42]. Problem rozpatrywano również z punktu widzenia konsekwencji jednoczesnego zamknięcia kilku elementów sieci [37, 38, 43] oraz różnych wariantów organizacji ruchu zaproponowanych w czasie zamknięć [44, 45, 46]. Jednym z ważnych aspektów pomijanych jednak często w stosowanych modelach statycznych jest brak uwzględnienia pewnego okresu przejściowego zachwiania równowagi mającego miejsce bezpośrednio po wprowadzeniu zamknięcia, wynikającego z procesu adaptacji użytkowników sieci do nowych warunków. Czas adaptacji do nowej sytuacji może być różny i ściśle zależy od rodzaju, formy, sposobu i momentu dostarczenia i odebrania określonej informacji. Założenie przyjmowane w modelach klasycznych o stanie równowagi w sieci nie jest wtedy spełnione, gdyż użytkownicy nie posiadając pełnej informacji o warunkach ruchu zazwyczaj nie zachowują się w sposób racjonalny. Wyniki uzyskane na podstawie tych modeli mogą się więc charakteryzować pewnym stopniem niedokładności w ocenie konsekwencji wprowadzenia zmian w strukturze sieci, co oznacza, że wartości kosztów podróży mogą być zaniżone.

2. CHARAKTERYSTYKA PROCESU DECYZYJNEGO PODRÓŻNYCH

W zależności od przyjętych założeń dotyczących zachowań osoby podejmującej decyzję wyróżnia się podejście normatywne [12, 13, 36] i deskryptywne. W modelach normatywnych zakłada się, że decydent podejmuje w pełni racjonalne decyzje zgodne z optymalizacją ściśle określonej funkcji celu, wykorzystując w jak najkorzystniejszy sposób dostępne mu informacje. Takie zachowanie można opisać z wykorzystaniem metod bazujących na wiedzy z zakresu matematyki, statystyki czy ekonomii. Modele deskryptywne stosowane są do opisu typowych zachowań człowieka w danej sytuacji decyzyjnej. W tym podejściu uwzględnia się zależności o charakterze psychologicznym i socjologicznym, poprzez badanie wpływu cech osobowościowych oraz uwarunkowań społecznych na podejmowane decyzje. Decyzje dotyczące sposobu realizacji podróży, ze względu na udział czynnika ludzkiego, podejmowane są w warunkach niepewności i ryzyka. W związku z tym charakteryzują się one brakiem dostatecznej ilości informacji wyjściowych oraz trudnościami w przewidzeniu negatywnych skutków podjętej decyzji.

Decyzje podejmowane przez poszczególnych podróżnych uzależnione są od wielu czynników, które można podzielić na trzy grupy [23]:

- czynniki związane ze środkami (podsystemami) transportu dostępnymi dla określonych grup podróżnych,

⁵ W pracy [30] zaproponowano model przemieszczania obiektów w sieci o zmiennej strukturze, wynikającej z niszczenia tras przejazdu przez potencjalnego przeciwnika podczas działań bojowych.

⁶ Autorzy pracy [7] dokonali również klasyfikacji ze względu na typ i zakres działań podejmowanych w związku z wprowadzeniem tymczasowych zmian w organizacji ruchu.

- czynniki związane z typem podróży,
- czynniki związane z cechami określonych grup podróźnych.

Decyzje związane z wyborem odpowiedniego środka transportu mogą być często podejmowane *a priori* w kontekście oceny jakości funkcjonowania całego podsystemu transportowego [25, 27, 35]. Z punktu widzenia użytkownika najczęściej wyodrębnia się kilka kryteriów syntetycznych (np. dostępność, czas podróży, warunki podróży, koszt, niezawodność), w ramach których następnie określa się w sposób szczegółowy szereg kryteriów cząstkowych. W przypadku podróży odbywanych cyklicznie ważne jest również gromadzenie określonych wrażeń po realizacji podróży, związanych ze stopniem spełnienia oczekiwań z podjętej decyzji. Odpowiedni poziom zadowolenia może prowadzić do powtórzenia określonej sekwencji przemieszczeń, a w efekcie do utrwalenia zachowań komunikacyjnych. Należy jednak podkreślić, że zarówno preferencje użytkowników, jak i sposób postrzegania przez nich możliwości sprawnego przemieszczania są w znacznym stopniu zależne od potrzeby realizacji podróży w wyznaczonym okresie. Na tej podstawie można wyróżnić podróże ściśle terminowe, wymagające przybycia do celu o ściśle ustalonej porze (np. podróże do pracy przy sztywnych godzinach rozpoczynania pracy, dojazdy do dworców celem odbycia podróży zamiejskiej, podróże na zebrania, imprezy o dokładnym czasie rozpoczynania itp.) oraz podróże nie ściśle terminowe, nie wymagające przybycia do celu w określonym momencie (np. podróże do pracy przy ruchomych godzinach rozpoczynania pracy, podróże powrotne do domu, na zakupy, itp.) [25].

Podróźni charakteryzują się określonymi cechami, które wpływają na sposób postrzegania atrybutów danego podsystemu transportowego funkcjonującego w mieście. Ogólnie cechy te można podzielić na następujące grupy [35]:

- kulturowe (przynależność do określonej grupy reprezentującej specyficzne wartości i formy zachowań),
- społeczne (oczekiwania otoczenia, pozycja zajmowana w rodzinie, status osoby podróżującej w społeczeństwie),
- personalne (wiek i etap życia, zawód, warunki ekonomiczne, styl życia, osobowość),
- psychologiczne (motywacje, spostrzeganie, proces uczenia się, przekonania i postawy).

Cechy te można rozszerzać na pewne zbiorowości, tworząc określone grupy podróźnych o jednorodnych zachowaniach komunikacyjnych.

Zasadniczą rolę w modelowaniu zachowań komunikacyjnych podróźnych w przypadku zamknięcia ulicy pełni proces informowania podróźnych. Reakcje użytkowników systemu transportowego zależą m.in. od zawartości dostępnej informacji, jej typu, sposobu prezentacji, atrybutów (wiarygodność, dokładność, znaczenie) oraz momentu jej otrzymania [3, 8, 18]. Z punktu widzenia wiarygodności informacji istotne jest również jej źródło⁷.

Informacja uzyskana przed podjęciem podróży (typu *pre-trip*) umożliwia odpowiednie zaplanowanie sposobu przemieszczania poprzez m.in. wybór momentu wyjazdu, odpowiedniej drogi czy środka transportu. Coraz ważniejszym źródłem pozyskiwania tego typu informacji, obok telewizji, radia i usług telefonicznych, staje się Internet. Z kolei informacja uzyskiwana podczas realizacji podróży (typu *en-route*), poprzez dostarczenie danych o aktualnych warunkach ruchu oraz oferowanie alternatywnych sposobów kontynuowania podróży, umożliwia podróźnym dokonywanie bieżącej korekty w planie podróży. Informacja tego typu przekazywana jest zwykle w postaci znaków zmiennej treści, systemów nawigacji samochodowej czy innych zaawansowanych systemów informacji podróźnych [1]. Modelowanie zachowań komunikacyjnych w przypadku korzystania z tego typu informacji jest znacznie bardziej złożone, gdyż wymaga uwzględnienia skutków decyzji podejmowanych przez użytkowników w strategicznych węzłach sieci.

Wykorzystanie informacji o ruchu w podejmowaniu decyzji związanych ze sposobem podróży zależy również od cech samych uczestników ruchu i ich reakcji na dostarczoną informację [18]. Nawet w sytuacji pełnego dostępu do informacji, nie ma pewności, że podróźny rzeczywiście z niej skorzysta. Ponadto istnieje sprzężenie zwrotne pomiędzy informacją predykcijną a obecnym wykorzystaniem sieci oraz reakcjami samych podróźnych na te informacje. Często informacje o charakterze predykcijnym pochodzą z prognoz

⁷ Jako podstawowe źródła informacji podaje się m.in. własne doświadczenie, opinie innych osób, systemy zarządzania oraz przekaz medialny [2].

przyszłych warunków, ale te warunki same są uzależnione od tego, w jaki sposób użytkownicy zareagują na prognozy, które otrzymają.

Budowa modelu jest procesem prowadzącym do odwzorowania rzeczywistości w sposób uproszczony [12, 13, 19]. Poziom agregacji danych i zmiennych wykorzystywanych w modelu oraz związany z tym dopuszczalny stopień uproszczenia modelu zależy głównie od celu badań. Często trzeba dokonywać wyboru pomiędzy wiarygodnością modelu a możliwościami jego budowy związanymi ze złożonością i długim czasem obliczeń. Nie bez znaczenia są również czynniki ekonomiczne, wynikające z konieczności uzyskania odpowiednio liczego zbioru danych. W związku z tym z jednej strony stosuje się modele mikrosymulacyjne, które w pełni odwzorowują zależności dynamiczne i umożliwiają uzyskanie wiarygodnych wyników, ale wymagają bardzo szczegółowych danych, dobrze przeprowadzonej kalibracji oraz długich czasów obliczeń [14]. Z drugiej strony budowane się modele statyczne, w których czas podróży wyznaczany jest na podstawie założenia, że podróżni mają dokładną wiedzę o aktualnych warunkach w sieci, w związku z czym następuje krótki okres adaptacji ruchu do nowej sytuacji zgodnej z zasadą równowagi optymalnej z punktu widzenia użytkownika [21]. Pomimo tego, że w najprostszyc z tych modeli często nie uwzględnia się efektu kongestii [15, 31], to jednak ze względu na wykorzystanie relatywnie małej liczby danych i krótkie czasy obliczeń, stają się one atrakcyjne dla analiz dotyczących dużych sieci. Opracowany model zawiera elementy zarówno jednego, jak i drugiego podejścia.

3. MODEL PRZEMIESZCZANIA POTOKÓW RUCHU W GĘSTYCH SIECIACH TRANSPORTOWYCH DLA POTRZEB ODWZOROWANIA STRUKTURY PODRÓŻY

Do odwzorowania struktury sieci miejskiej najczęściej wykorzystuje się teorię grafów. Zgodnie z jej założeniami strukturę sieci miejskiej można opisać np. w postaci grafu Berge'a⁸ jako [6, 12, 13, 19]:

$$G = \langle W, L \rangle \quad (1)$$

gdzie:

- W** – zbiór numerów wierzchołków grafu G , będący odwzorowaniem zbioru wszystkich węzłów sieci miejskiej, tj.: $W = \{w : w = 1, \dots, \bar{W}\}$, gdzie \bar{W} oznacza liczebność zbioru W ,
- L** – zbiór łuków grafu G , będący odwzorowaniem zbioru istniejących w rzeczywistości połączeń między wierzchołkami grafu, tj. $L = \{(w, w') : (w, w') \in W \times W, w \neq w'\}$.

Zbiór węzłów sieci miejskiej W można zdekomponować w zależności od roli, jaką pełnią w przepływie potoku ruchu na trzy parami rozłączne podzbiory [13]:

- A** – zbiór węzłów początku relacji przemieszczania (źródło potoku ruchu), tj. $A = \{a : a \in W\}$,
- B** – zbiór węzłów końca relacji przemieszczania (ujście potoku ruchu), tj. $B = \{b : b \in W\}$,
- V** – zbiór węzłów pośrednich, tj. $V = \{v : v \in W\}$.

Na tej podstawie określono zbiór relacji E , tj. $E = \{(a, b) : (a, b) \in A \times B\}$ [13], opisujących związek pomiędzy poszczególnymi węzłami będącymi źródłami potoku ruchu a węzłami stanowiącymi ujście potoku ruchu. Ponadto przyjęto założenie, że dla każdej relacji przewozu $(a, b) \in E$ istnieje skończony zbiór dróg łączących wyróżnione wierzchołki. Poprzez drogę należy rozumieć sekwencję nie powtarzających się węzłów i łuków, przez które kolejno przemieszcza się potok ruchu w określonej relacji przewozu⁹ [9]. W związku z tym drogę $p_{(a,b)}$ opisano jako:

$$p_{(a,b)} = \langle a, (a, w), w, \dots, w', (w', b), b \rangle \quad (2)$$

⁸ Poprzez graf Berge'a należy rozumieć każdy graf będący digrafem i unigrafem [17].

⁹ Droga może być również przedstawiona w postaci sekwencji kolejnych węzłów ($p_{(a,b)} = \langle a, w, \dots, w', b \rangle$) lub łuków ($p_{(a,b)} = \langle (a, w), (w, \dots), \dots, (\dots, w'), (w', b) \rangle$) [13].

gdzie $a, w, \dots, w', b \in W$ oraz $(a, w), (w, \dots), \dots, (\dots, w'), (w', b) \in L$. Zbiór wszystkich dróg w relacji $(a, b) \in E$ można opisać jako [13]:

$$P_{(a,b)} = \{p_{(a,b)} : (a, b) \in E\} \quad (3)$$

Zbiór wszystkich łuków należących do drogi $p_{(a,b)}$ można więc przedstawić jako:

$$L_{(a,b)}^p = \{(w, w') : (w, w') \in p_{(a,b)}, (w, w') \in L, p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}\} \quad (4)$$

Analogicznie zdefiniowano zbiór $W_{(a,b)}^p$ wszystkich wierzchołków należących do drogi $p_{(a,b)}$, tzn:

$$W_{(a,b)}^p = \{w : w \in p_{(a,b)}, w \in W, p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}\} \quad (5)$$

Ponadto dla potrzeb modelowania określono zbiór numerów środków transportu S jako: $S = \{s : s = 1, \dots, \bar{S}\}$, gdzie \bar{S} jest liczebnością zbioru S ¹⁰. W związku z tym dla odwzorowania potoku ruchu¹¹ przyjęto następujące oznaczenia:

- x_a – wielkość potoku ruchu generowanego w węźle początkowym $a \in A$, $x_{(a,b)}$ - wielkość potoku ruchu przemieszczanego w relacji $(a, b) \in E$,
- $x_{p_{(a,b)}}$ – wielkość potoku ruchu przemieszczanego drogą $p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}$,
- $x_{(w,w')}$ – wielkość potoku ruchu przemieszczanego ulicą odwzorowaną łukiem (w, w') ,
- $x_{(a,b),s}$ – wielkość potoku ruchu przemieszczanego w relacji $(a, b) \in E$ z wykorzystaniem s -tego środka (podsystemu) transportu,
- $x_{p_{(a,b)},s}$ – wielkość potoku ruchu przemieszczanego drogą $p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}$ z wykorzystaniem s -tego środka (podsystemu) transportu,
- $x_{p_{(a,b)},(w,w')}$ – wielkość potoku ruchu przemieszczanego drogą $p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}$ zawierającą ulicę odwzorowaną łukiem (w, w') grafu G .

W zależności od przyjętej funkcji kosztu oraz organizacji ruchu potok przemieszczany w relacji $(a, b) \in E$ może wykorzystywać różną liczbę dróg $p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}$, a jego wielkość $x_{p_{(a,b)}}$ na każdej z nich także może być różna. W przypadku zamknięcia ulicy odwzorowanej łukiem (w, w') należy zidentyfikować wielkości potoku ruchu $x_{p_{(a,b)},(w,w')}$ przemieszczanego różnymi drogami $p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}$ zawierającymi ten łuk. Zbiór dróg w relacji $(a, b) \in E$, zawierających łuk (w, w') można zapisać jako [13]:

$$P_{(a,b),(w,w')} = \{p_{(a,b)} : (w, w') \in L_{(a,b)}^p, p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}\} \quad (6)$$

Natomiast zbiór dróg w relacji $(a, b) \in E$, zawierających wierzchołek w można przedstawić w postaci:

$$P_{(a,b),w} = \{p_{(a,b)} : w \in W_{(a,b)}^p, p_{(a,b)} \in P_{(a,b)}\} \quad (7)$$

Zbiór wszystkich dróg zawierających łuk (w, w') jest sumą zbiorów $P_{(a,b),(w,w')}$, wyznaczonych dla wszystkich relacji $(a, b) \in E$, tzn.:

¹⁰ Zbiór S może być utożsamiany z różnymi podsystemami transportowymi funkcjonującymi w obszarze miasta.

¹¹ Dla celów modelowania przyjęto, że jednostką potoku ruchu przemieszczającego się poszczególnymi elementami sieci jest liczba użytkowników sieci.

$$P_{(w,w')} = \sum_{(a,b) \in E} P_{(a,b),(w,w')} \quad (8)$$

Podobnie zbiór wszystkich dróg zawierających wierzchołek w jest sumą zbiorów $P_{(a,b),w}$, wyznaczonych dla wszystkich relacji $(a,b) \in E$, tzn.:

$$P_w = \sum_{(a,b) \in E} P_{(a,b),w} \quad (9)$$

W większości stosowanych modeli przyjmuje się założenie o ścisłej zależności pomiędzy czasem a kosztem podróży, co oznacza, że wzrost czasu podróży, generuje większe jej koszty. Ponadto czas przemieszczania poszczególnymi elementami sieci jest zależny zarówno od wielkości potoku ruchu (wyrażanego najczęściej w jednostkach środków transportu) na tych elementach, jak również od wielkości potoku ruchu na elementach z nimi powiązanych [34].

Dla potrzeb modelowania wprowadzono następujące oznaczenia¹²:

- $t_{(w,w')}$ - czas przejazdu ulicy odwzorowanej łukiem $(w,w') \in L$,
- t_w - czas przejazdu węzła odwzorowanego wierzchołkiem $w \in W$,
- $t_{p(a,b)}$ - czas przejazdu drogi $p(a,b) \in P_{(a,b)}$, przy czym:

$$t_{p(a,b)} = \sum_{(w,w') \in L_{p(a,b)}} t_{(w,w')} + \sum_{w \in W_{p(a,b)}} t_w \quad (10)$$

Drogę optymalną z punktu widzenia najkrótszego czasu podróży można więc zapisać jako:

$$p^*_{(a,b)} : t_{p^*_{(a,b)}} = \min_{p(a,b) \in P_{(a,b)}} \{t_{p(a,b)}\} \quad (11)$$

Po usunięciu ze zbioru dróg $P_{(a,b)}$ wszystkich dróg zawierających łuk (w,w') , czyli zbioru dróg $P_{(a,b),(w,w')}$, drogę optymalną z punktu widzenia najkrótszego czasu podróży należącą do tak utworzonego podzbioru $P_{(a,b)} - P_{(a,b),(w,w')}$ można zapisać jako:

$$p^{**}_{(a,b)} : t_{p^{**}_{(a,b)}} = \min_{p(a,b) \in P_{(a,b)} - P_{(a,b),(w,w')}} \{t_{p(a,b)}\} \quad (12)$$

W modelowaniu zachowań podróżnych w przypadku zamknięcia ulicy odwzorowanej łukiem (w,w') właśnie droga $p^{**}_{(a,b)}$ może być traktowana jako najlepsza potencjalna droga alternatywna z punktu widzenia minimalnego czasu podróży¹³.

W gęstych sieciach miejskich dla określonej relacji podróży $(a,b) \in E$ istnieje wiele możliwych dróg tworzących zbiór $P_{(a,b)}$. W związku z tym w opracowanym modelu założono, że dla każdego odcinka ulicy

¹² Dla uproszczenia w zapisie pominięto uwzględnienie zależności od wielkości potoku ruchu.

¹³ Oddzielnym zagadnieniem jest przebieg drogi oznaczanej jako $p^{**}_{(a,b)}$. W literaturze obok zagadnień dotyczących tego, czy podróżny w ogóle skorzysta z drogi objazdowej w przypadku zamknięcia, kluczowym aspektem jest to, czy po „ominięciu” zamkniętej ulicy innymi drogami powróci na pierwotnie wybraną drogę (oznaczoną jako $p^*_{(a,b)}$), czy też będzie kontynuował podróż zupełnie nową drogą (przy określonej strukturze sieci może się zdarzyć, że droga $p^{**}_{(a,b)}$ w swoim przebiegu częściowo będzie się pokrywała z przebiegiem drogi $p^*_{(a,b)}$). Według autorów pracy [16] zachowania komunikacyjne różnią się w zależności od atrybutów socjoekonomicznych samych podróżnych oraz celu i czasu podróży. Osoby, które wykonują dłuższą podróż w sytuacji większego opóźnienia i mniejszej oczekiwanej kongestii na drogach alternatywnych, chętniej korzystają z dróg objazdowych, ale również są bardziej skłonni do powrotu na drogę pierwotną po ominięciu zamkniętego odcinka drogi.

odwzorowanego łukiem (w, w') istnieje przynajmniej jedna droga alternatywna $p_{(a,b)} \in P_{(a,b)} - P_{(a,b),(w,w')}$. Przyjęto ponadto, że bezpośrednią konsekwencją zamknięcia jest wzrost czasu podróży użytkowników. Czas ten jest traktowany jako prosty wskaźnik dostępności i może być w dalszych etapach analizy uogólniony w taki sposób, aby zawierał również zmiany związane z kosztami podróży. W opracowanym modelu założono również, że wszyscy użytkownicy dążą do minimalizacji swojego czasu podróży przy wyborze drogi z punktu początkowego do docelowego zgodnie z poziomem wiedzy, który posiadają oraz przyjęto, że reakcją podróżnych na informację o zamknięciu ulicy może być zmiana drogi albo, jeżeli jest to korzystniejsze, opóźnienie swojej podróży dopóki ulica nie zostanie ponownie otwarta¹⁴.

Proces decyzyjny¹⁵ podróżnego zachowującego się w sposób racjonalny ma strukturę hierarchiczną, w której można wyróżnić następujące poziomy [4, 22]:

- Poziom 1 – podjęcie przez potencjalnego podróżnego znajdującego się w punkcie a decyzji o realizacji podróży w określonym celu (np. praca, nauka, rekreacja, zdrowie, inne) w danym przedziale czasu t (np. godzina, doba)¹⁶,
- Poziom 2 – podjęcie decyzji o miejscu docelowym podróży b przez osobę, która dokonała wyboru na poziomie 1,
- Poziom 3 – podjęcie decyzji o środku transportu s przez podróżnego, który dokonał wyborów na poziomie 1 i 2,
- Poziom 4 – podjęcie decyzji o drodze przemieszczania p przez podróżnego, który dokonał wyborów na trzech wcześniejszych poziomach.

Założenia te zostały wykorzystane w klasycznym modelu stosowanym w planowaniu potoków ruchu w miastach [3, 23]. Na rys.1 przedstawiono strukturę hierarchiczną procesu decyzyjnego oraz jego powiązanie z klasycznym modelem ruchu. Przez n_a oznaczono liczbę wszystkich potencjalnych podróżnych w punkcie a , natomiast przez Pr_a , $Pr_{b/a}$, $Pr_{s/(a,b)}$ oraz $Pr_{p/((a,b),s)}$ - prawdopodobieństwa dokonania określonego wyboru na każdym z czterech poziomów procesu decyzyjnego.

W przypadku zamknięcia odcinka sieci drogowej będącej elementem planowanej wcześniej drogi podróżny może więc zareagować w jeden z następujących sposobów [4, 20]:

- rezygnacja z podróży (zmiana w procesie generowania podróży),
- przesunięcie podróży w czasie (zmiana w rozkładzie czasowym podróży),
- wybór innego miejsca docelowego (zmiana w rozkładzie przestrzennym podróży),
- wybór innego środka (podsystemu) transportu (zmiana w podziale modalnym¹⁷),
- wybór innej drogi (zmiana w rozkładzie potoków ruchu na sieć transportową).

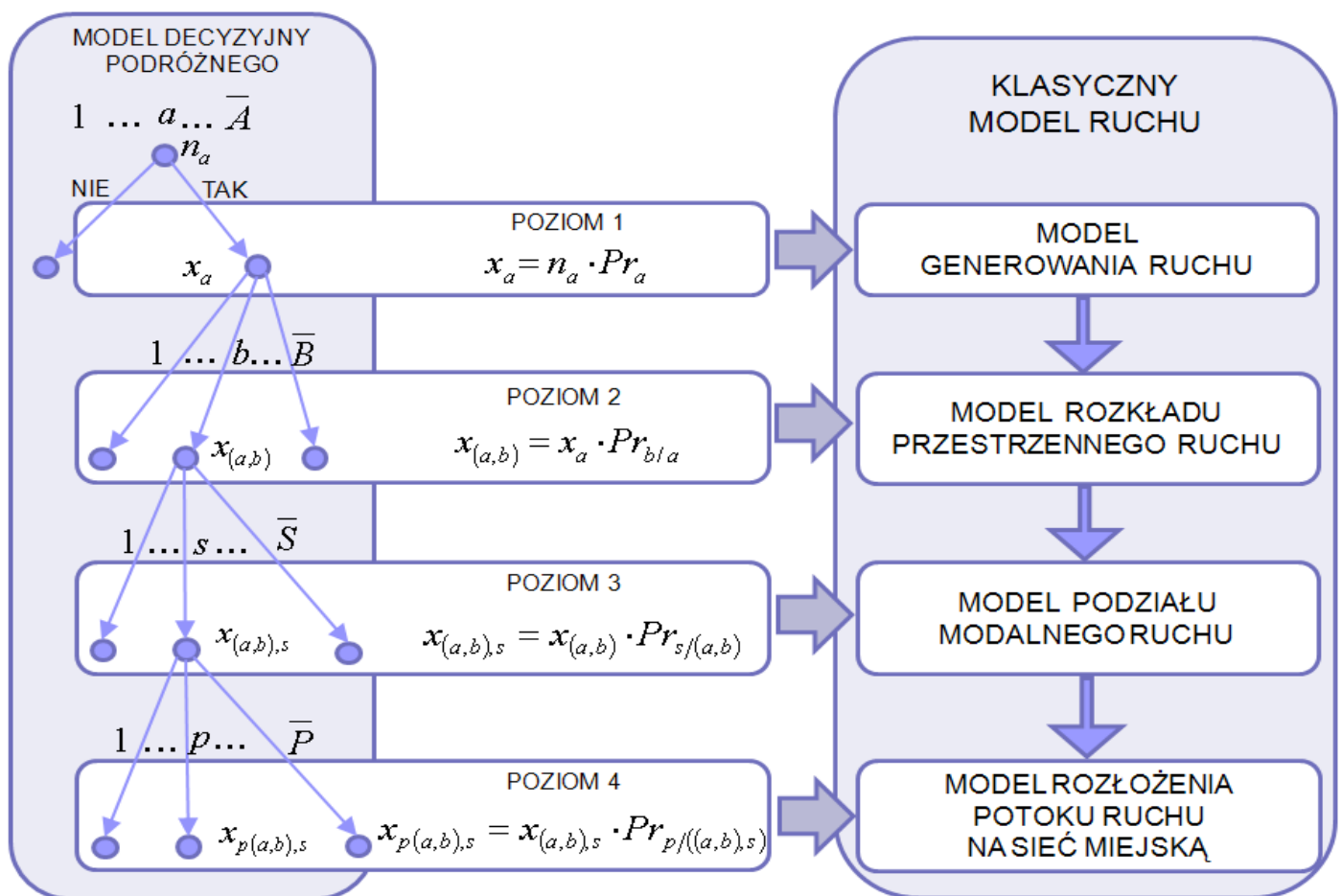
Problemy modelowania zachowań komunikacyjnych podróżnych ze szczególnym uwzględnieniem wyboru drogi poruszano m.in. w pracach [37, 38, 47].

¹⁴ W rzeczywistości, zgodnie z modelem decyzyjnym przedstawionym na rys.1, jest bardzo prawdopodobne, że w zależności od typu podróży, niektórzy użytkownicy zmieniają środek transportu, miejsce docelowe podróży lub całkowicie zrezygnują z podróży. Taka decyzja oznaczałaby, że użytkownik postrzega koszt (albo uciążliwość) takiej zmiany jako niższy niż koszt opóźnienia wcześniej zaplanowanej podróży.

¹⁵ Proces decyzyjny można zdefiniować jako grupę logicznie powiązanych ze sobą operacji myślowych, prowadzących do rozwiązania problemu decyzyjnego poprzez wybranie jednego z możliwych wariantów działania (decyzji).

¹⁶ Przesunięcie podróży w czasie traktowane jest jako rezygnacja z jej realizacji w analizowanym przedziale czasu t .

¹⁷ Przez podział modalny należy rozumieć przydział odpowiednich środków transportu do zadań przewozowych.



Rys.1. Struktura hierarchiczna procesu decyzyjnego w ujęciu normatywnym.

4. MODEL ZACHOWAŃ PODRÓŻNYCH W WARUNKACH ZAMKNIĘĆ ULIC

Zamknięcie ulicy odwzorowanej łukiem (w, w') w określonym przedziale czasu jest przedstawione w postaci tymczasowego usunięcia tego łuku ze struktury sieci miejskiej, odwzorowanej grafem G . Specyfika analizowanego zagadnienia wymaga więc uwzględnienia zmiennej w czasie struktury sieci. Moment rozpoczęcia zamknięcia określonej ulicy odwzorowanej łukiem (w, w') grafu G , określono jako $\varphi_{(w,w')}$, natomiast moment zakończenia zamknięcia tej ulicy – jako $\tau_{(w,w')}$, przy czym $\varphi_{(w,w')} \in \mathcal{R}^+ \cup \{0\}$ oraz $\tau_{(w,w')} \in \mathcal{R}^+$. Zarówno moment $\varphi_{(w,w')}$, jak i moment $\tau_{(w,w')}$ określone są na osi czasu rzeczywistego.

Ponadto z punktu widzenia modelowania zachowania pojedynczego użytkownika systemu transportowego istotne są dwa momenty:

- moment uzyskania informacji o rozpoczęciu zamknięcia,
- moment uzyskania informacji o zakończeniu zamknięcia.

W przypadku zamknięć planowanych często informacja o rozpoczęciu i zakończeniu zamknięcia dostarczana jest z pewnym wyprzedzeniem. Wtedy najwcześniejszym możliwym momentem uzyskania informacji o rozpoczęciu zamknięcia ulicy odwzorowanej łukiem (w, w') grafu G , jest moment dostarczenia jej przez zarządzającego ruchem. W przypadku zamknięć nieplanowanych moment ten jest jednoznaczny z momentem rozpoczęcia zamknięcia¹⁸.

Dla celów modelowania wprowadzono następujące oznaczenia:

¹⁸ W opracowanym modelu nie rozpatruje się sposobu uzyskania takich informacji przez podróżnego.

$\tau p_{(w,w')}^{pinf}$ – najwcześniejszy możliwy moment uzyskania przez podróżnego informacji o rozpoczęciu zamknięcia ulicy odwzorowanej (w, w') -tym łukiem grafu G,

$\tau k_{(w,w')}^{pinf}$ – najwcześniejszy możliwy moment uzyskania przez podróżnego informacji o zakończeniu zamknięcia ulicy odwzorowanej (w, w') -tym łukiem grafu G,

$\tau p_{(w,w')}^{kinf}$ – najpóźniejszy możliwy moment uzyskania przez podróżnego informacji o rozpoczęciu zamknięcia ulicy odwzorowanej (w, w') -tym łukiem grafu G,

$\tau k_{(w,w')}^{kinf}$ – najpóźniejszy możliwy moment uzyskania przez podróżnego informacji o zakończeniu zamknięcia ulicy odwzorowanej (w, w') -tym łukiem grafu G,

przy czym $\tau p_{(w,w')}^{pinf} \in \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}$, $\tau k_{(w,w')}^{pinf} \in \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}$, $\tau p_{(w,w')}^{kinf} \in \mathfrak{R}^+$, $\tau k_{(w,w')}^{kinf} \in \mathfrak{R}^+$ oraz $\tau p_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau k_{(w,w')}^{pinf}$, $\tau p_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau p_{(w,w')}^{kinf}$, $\tau k_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau k_{(w,w')}^{kinf}$. Ponadto dla zamknięć planowanych zachodzi zależność $\tau p_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau p_{(w,w')}$, natomiast dla zamknięć nieplanowanych – $\tau p_{(w,w')}^{pinf} = \tau p_{(w,w')}$. W przypadku informacji o zakończeniu zamknięcia ulicy – zarówno dla zamknięć planowanych, jak i nieplanowanych zachodzi zależność $\tau k_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau k_{(w,w')}$ ¹⁹.

Dodatkowo dla celów modelowania wprowadzono dwie funkcje, określone jako:

- $inf_{(w,w')}^{pz}(\tau)$ - udział podróżnych, planujących przemieszczanie się drogą $p_{(a,b)}$ zawierającą ulicę, odwzorowaną (w, w') -tym łukiem grafu G, tzn. $(w, w') \in L_{(a,b)}^p$, posiadających w momencie τ informację o rozpoczęciu jej zamknięcia,
- $inf_{(w,w')}^{kz}(\tau)$ - udział podróżnych, planujących przemieszczanie się drogą $p_{(a,b)}$ zawierającą ulicę, odwzorowaną (w, w') -tym łukiem grafu G, tzn. $(w, w') \in L_{(a,b)}^p$, posiadających w momencie τ informację o zakończeniu jej zamknięcia.

Przebieg tych funkcji w czasie można opisać jako:

- $inf_{(w,w')}^{pz}(\tau) = 0$ dla $\tau < \tau p_{(w,w')}^{pinf}$ oraz $inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) = 0$ dla $\tau < \tau k_{(w,w')}^{pinf}$,
- $inf_{(w,w')}^{pz}(\tau) = 1$ dla $\tau \geq \tau p_{(w,w')}^{kinf}$ oraz $inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) = 1$ dla $\tau \geq \tau k_{(w,w')}^{kinf}$,
- w pozostałych przypadkach, tzn. dla $\tau p_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau < \tau p_{(w,w')}^{kinf}$ oraz $\tau k_{(w,w')}^{pinf} \leq \tau < \tau k_{(w,w')}^{kinf}$ odpowiednio funkcje $inf_{(w,w')}^{pz}(\tau)$ oraz $inf_{(w,w')}^{kz}(\tau)$ są niemalejące, czyli $inf_{(w,w')}^{pz}(\tau) \leq inf_{(w,w')}^{pz}(\tau')$ oraz $inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) \leq inf_{(w,w')}^{kz}(\tau')$ dla $\tau < \tau'$ ²⁰.

Ponadto przyjęto następujące oznaczenia:

τd_w - moment dojazdu do wierzchołka $w \in W$,

τw_w - moment wyjazdu z wierzchołka $w \in W$.

Jeżeli przez węzeł odwzorowany wierzchołkiem $w \in W$ potok ruchu przepływa w sposób płynny nie doznając żadnych zakłóceń, to można przyjąć²¹, że $\tau d_w = \tau w_w$.

Sposób zachowania podróżnych w sytuacji zamknięcia ulicy odwzorowanej łukiem (w, w') , należącym do zbioru dróg przemieszczania w określonej relacji podróży $(a,b) \in E$, tzn. $(w, w') \in L_{(a,b)}^p$, określono w zależności od planowanego momentu wyjazdu z miejsca początkowego z uwzględnieniem czasu dojazdu do odcinka zamykanego oraz posiadania informacji o rozpoczęciu i zakończeniu zamknięcia (w, w') -tej ulicy w momencie wyjazdu τw_a . Założono również, że pojazdy znajdujące się na zamykanym odcinku (w, w')

¹⁹ Oznacza to przyjęcie założenia, że zarówno w przypadku zamknięcia planowanego, jak i nieplanowanego informacja o zakończeniu zamknięcia może być dostarczona z wyprzedzeniem przez zarządzającego ruchem.

²⁰ Przy przyjęciu stałej intensywności rozprzestrzeniania się informacji funkcje te będą funkcjami liniowymi [14].

²¹ Możliwość przyjęcia tego założenia jest zależna od stopnia agregacji modelu.

w momencie $\varphi_{(w,w')}$ dojadą do końca tego odcinka bez zakłóceń. Czas przemieszczania z miejsca początkowego podróży do odcinka zamykanego (w, w') określono jako $t_{p(a,w)}$, gdzie droga $p_{(a,w)} \subset p^*_{(a,b)}$. Stąd moment dojazdu τd_w do węzła w , będącego początkiem zamykanego odcinka (w, w') jest równy:

$$\tau d_w = \tau w_a + t_{p(a,w)} \quad (13)$$

W związku z tym, w zależności od planowanego momentu wyjazdu z miejsca początkowego podróży, można wyróżnić trzy sytuacje:

- sytuacja 1 – w której, na podstawie planowanego wyjazdu z miejsca początkowego a podróżny dotarłby do zamykanej ulicy przed rozpoczęciem jej zamknięcia, tzn. $\tau w_a < \varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)}$,
- sytuacja 2 – w której, na podstawie planowanego wyjazdu z miejsca początkowego a podróżny dotarłby do zamykanej ulicy w czasie jej zamknięcia, tzn. $\varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)} \leq \tau w_a < \tau k_{(w,w')} - t_{p(a,w)}$,
- sytuacja 3 – w której, na podstawie planowanego wyjazdu z miejsca początkowego a podróżny dotarłby do zamykanej ulicy po zakończeniu jej zamknięcia, tzn. $\tau w_a \geq \tau k_{(w,w')} - t_{p(a,w)}$.

Różne warianty zachowań podróźnych dla określonej relacji $(a,b) \in E$ z punktu widzenia stanu posiadanej wiedzy o rozpoczęciu i zakończeniu zamknięcia ulicy (w, w') w momencie wyjazdu τw_a zestawiono w tablicy 1. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami nie wzięto pod uwagę sytuacji, gdy podróżny w momencie wyjazdu posiada informację o zakończeniu zamknięcia ulicy, a nie posiada informacji o jej rozpoczęciu. Nie uwzględniono również przypadku, gdy podróżny posiadając informację o momencie rozpoczęcia zamknięcia ulicy (w, w') dokonuje przyspieszenia momentu wyjazdu τw_a w taki sposób, aby uniknąć konieczności ominięcia zamkniętej ulicy.

W modelu założono, że podróżny pierwotnie planuje realizację podróży optymalną²² drogą $p^*_{(a,b)}$. W przypadku zamknięcia ulicy (w, w') , która stanowi odcinek drogi $p^*_{(a,b)}$, tzn. $(w, w') \in L^p_{(a,b)}$, użytkownik zmuszony jest zmienić planowany sposób podróży, a jego decyzje uzależnione są od momentu uzyskania informacji o rozpoczęciu i zakończeniu zamknięcia.

Tablica 1. Charakterystyka zachowań podróźnych w zależności od posiadanej informacji.

Sytuacja	Informacja o rozpoczęciu zamknięcia	Informacja o zakończeniu zamknięcia	Zachowanie podróźnego
Sytuacja 1	TAK	TAK	Wybór drogi $p^*_{(a,b)}$
		NIE	
Sytuacja 2	TAK	TAK	Wybór drogi $p^{**}_{(a,b)}$ lub przesunięcie w czasie momentu wyjazdu o $\Delta \tau w_a$
		NIE	Wybór drogi $p^{**}_{(a,b)}$
	NIE	Dojazd do miejsca w' uzyskania informacji o zamkniętej ulicy drogą $p_{(a,w')} \subset p^*_{(a,b)}$, a następnie kontynuacja podróży drogą $p^{**}_{(w',b)}$	
Sytuacja 3	TAK	TAK	Wybór drogi $p^*_{(a,b)}$
		NIE	Wybór drogi $p^{**}_{(a,b)}$
	NIE	Wybór drogi $p^*_{(a,b)}$	

Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli istnieje możliwość wykorzystania dróg alternatywnych, przyjmuje się założenie, że podróżny wyjeżdżający z miejsca początkowego podróży w momencie τw_a , gdzie $\varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)} \leq \tau w_a < \tau k_{(w,w')} - t_{p(a,w)}$

²² Droga ta jest optymalna z punktu widzenia własnych kryteriów każdego podróźnego.

(sytuacja 2), posiadający informację o momencie rozpoczęcia zamknięcia, wybiera drogę $p^{**}_{(a,b)}$, która nie zawiera zamykanego odcinka (w, w') ²³. Udział podróżnych, którzy podejmą taką decyzję opisany jest wartością funkcji $\inf_{(w,w')}^{pz}(\tau)$ w momencie wyjazdu z miejsca początkowego podróży (dla $\tau = \tau w_a$)²⁴. Pozostała część podróżnych, określona jako $(1 - \inf_{(w,w')}^{pz}(\tau))$, rozpocznie podróż z miejsca a i będzie ją kontynuować drogą $p^*_{(a,b)}$ do miejsca w' odpowiadającego momentowi uzyskania informacji o zamknięciu ulicy (w, w') , czyli $p_{(a,w'')} \subset p^*_{(a,b)}$. Z tego miejsca podróżny będzie dalej realizować swoją podróż drogą $p^{**}_{(w'',b)}$ ²⁵, gdzie:

$$p^{**}_{(w'',b)} : t_{p^{**}(w'',b)} = \min_{p_{(w'',b)} \in P_{(w'',b)} - P_{(w'',b),(w,w')}} \{t_{p(w'',b)}\} \quad (14)$$

W takiej sytuacji najpóźniejszym możliwym momentem $\tau p_{(w,w')}^{kinf}$ uzyskania przez podróżnego informacji o rozpoczęciu zamknięcia ulicy odwzorowanej (w, w') -tym łukiem grafu G jest moment τd_w dojazdu do węzła w będącego początkiem zamykanej ulicy (w, w') , (czyli $w'' = w$).

Gdy podróżny posiada informację o momencie zakończenia zamknięcia ulicy (w, w') może dojść również do przesunięcia w czasie momentu jego wyjazdu z miejsca początkowego podróży τw_a , jeżeli opóźnienie wynikające z zamknięcia ulicy²⁶ $\Delta \tau w_a$ jest mniejsze niż różnica czasu przejazdu drogą $p^{**}_{(a,b)}$ oraz drogą $p^*_{(a,b)}$, tzn.: $\Delta \tau w_a < t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)}$. Pomiedzy czasami przemieszczania drogami, określonymi dla różnych sytuacji, zachodzi zależność:

$$t_{p(a,w'')} + t_{p^{**}(w'',b)} \geq t_{p^{**}(a,b)} \geq t_{p^*(a,b)} \quad (15)$$

Jeżeli moment wyjazdu z miejsca początkowego spełnia zależność $\tau w_a \geq \tau k_{(w,w')} - t_{p(a,w)}$ (sytuacja 3), a podróżny posiada informację o momencie rozpoczęcia zamknięcia $\tau p_{(w,w')}$, ale nie zna momentu jego zakończenia $\tau k_{(w,w')}$ to przyjęto, że podejmie taką samą decyzję, jak w sytuacji 2 przy tych samych założeniach, czyli wybierze drogę $p^{**}_{(a,b)}$. W związku z tym, zakładając, że spełniony jest warunek $\tau k_{(w,w')}^{kinf} \geq \tau k_{(w,w')}$, przyrost czasu $\Delta t_{p(a,b),(w,w')}$, wynikający z zamknięcia ulicy (w, w') , dla pojedynczego użytkownika planującego podróż drogą $p_{(a,b)} \in P_{(a,b),(w,w')}$, można zapisać jako:

– dla $\Delta \tau w_a \geq t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)}$:

²³ Nie wzięto tu pod uwagę sytuacji, kiedy użytkownik przemieszczający się drogą $p^{**}_{(a,b)}$, podczas realizacji podróży uzyskuje informację o zakończeniu zamknięcia i wraca na drogę $p^*_{(a,b)}$, jeżeli powoduje to zmniejszenie czasu przejazdu w relacji $(a, b) \in E$.

²⁴ Należy podkreślić, że jest to znaczne uproszczenie, w którym zakłada się, że dodatkowe koszty wynikające z wykorzystania innych sposobów osiągnięcia celu podróży (np. zmiana środka transportu czy zmiana miejsca docelowego) są znacznie większe niż koszty odpowiadające różnicy $t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)}$.

²⁵ W tym miejscu należałoby również poprzez przeprowadzenie odpowiedniej analizy kosztów i korzyści rozważać inne dostępne sposoby osiągnięcia celu podróży (np. zmiana środka transportu czy zmiana miejsca docelowego).

²⁶ Opóźnienie momentu wyjazdu z miejsca początkowego, wyrażane jako $\Delta \tau w_a = \tau k_{(w,w')} - \tau d_w$, w praktyce oznacza czas oczekiwania na zakończenie zamknięcia.

$$\begin{aligned} \Delta t_{p(a,b),(w,w')} = & \int_{\varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)}}^{\tau_{(w,w')} - t_{p(a,w)}} \left(\inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \cdot \left(t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)} \right) + \right. \\ & \left. + \left(1 - \inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \right) \cdot \left(t_{p(a,w'')} + t_{p^{**}(w'',b)} - t_{p^*(a,b)} \right) \right) d\tau + \\ & + \int_{\tau_{(w,w')} - t_{p(a,w)}}^{\tau_{(w,w')}^{kinf}} \inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \cdot \left(1 - \inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) \right) \cdot \left(t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)} \right) d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

– dla $\Delta \tau w_a < t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)}$:

$$\begin{aligned} \Delta t_{p(a,b),(w,w')} = & \int_{\varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)}}^{\tau_{(w,w')} - t_{p(a,w)}} \left(\inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \cdot \inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) \cdot \Delta \tau w_a + \right. \\ & \left. + \inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \cdot \left(1 - \inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) \right) \cdot \left(t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)} \right) + \right. \\ & \left. + \left(1 - \inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \right) \cdot \left(t_{p(a,w'')} + t_{p^{**}(w'',b)} - t_{p^*(a,b)} \right) \right) d\tau + \\ & + \int_{\tau_{(w,w')} - t_{p(a,w)}}^{\tau_{(w,w')}^{kinf}} \inf_{(w,w')}^{PZ}(\tau) \cdot \left(1 - \inf_{(w,w')}^{kz}(\tau) \right) \cdot \left(t_{p^{**}(a,b)} - t_{p^*(a,b)} \right) d\tau \end{aligned} \quad (17)$$

Przy tworzeniu grup podróży na podstawie założeń odniesionych do jednorodnych zachowań komunikacyjnych przyrost czasu $\Delta t_{p(a,b),(w,w')}$ należy wyznaczać oddzielnie dla każdej z grup [11]. Dla celów modelowania wprowadzono dodatkowe oznaczenie $x_{p(a,b),(\tau,\tau')}$ jako liczba użytkowników planujących podróż drogą $p(a,b) \in P_{(a,b),(w,w')}$, dla których moment wyjazdu z miejsca początkowego $\tau w_a \in (\tau, \tau')$. Przy założeniu stałej intensywności popytu w przedziale czasu $(\varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)}, \tau_{(w,w')}^{kinf})$, przyrost czasu dla wszystkich podróży $\Delta T_{p(a,b),(w,w')}$ planujących podróż wszystkimi drogami $p(a,b) \in P_{(a,b),(w,w')}$, wynikający z zamknięcia ulicy (w, w') , można opisać jako:

$$\Delta T_{p(a,b),(w,w')} = \sum_{p(a,b) \in P_{(a,b),(w,w')}} x_{p(a,b),(\varphi_{(w,w')} - t_{p(a,w)}, \tau_{(w,w')}^{kinf})} \cdot \Delta t_{p(a,b),(w,w')} \quad (18)$$

Stąd całkowity przyrost czasu $\Delta T_{(w,w')}$, wynikający z zamknięcia ulicy (w, w') można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$\Delta T_{(w,w')} = \sum_{(a,b) \in E} \Delta T_{p(a,b),(w,w')} \quad (19)$$

Na podstawie tak określonych wielkości strat czasu związanych z wprowadzeniem zamknięcia ulicy, można w dalszym etapie analiz w sposób uproszczony szacować koszty takiego zamknięcia zarówno z punktu widzenia poszczególnych użytkowników, jak i całego systemu transportowego. W takim

przypadku należy określić postrzeganą wartość czasu podróży dla każdej z grup podróżnych. Koszty określone w taki sposób mogą stanowić miarę oceny podatności systemu transportowego miasta na zakłócenia. Głównym problemem może się jednak okazać znalezienie odpowiedniej postaci funkcyjnej $\inf_{(w,w')}^{Pz}(\tau)$ oraz $\inf_{(w,w')}^{Kz}(\tau)$, a także oszacowanie czasu przemieszczania określonymi drogami w sieci charakteryzującej się znacznym poziomem zatłoczenia.

5. PODSUMOWANIE

Modelowanie zachowań komunikacyjnych podróżnych jest złożonym zagadnieniem, wymagającym kompleksowego podejścia z uwzględnieniem możliwości zastosowania nowoczesnych systemów informacyjnych. Jednocześnie analiza behawioralna dotycząca procesów decyzyjnych powinna opierać się założeniach dotyczących wszystkich użytkowników sieci. Dlatego w niektórych sytuacjach nie można bazować na modelach, które zakładają pełną wiedzę wszystkich podróżnych o warunkach panujących w sieci miejskiej.

Opracowany model jest próbą opisu zachowania pojedynczego podróżnego w warunkach zamknięcia jednego z elementów gęstej sieci miejskiej, jakim jest ulica. Model ten pomimo wielu przyjętych uproszczeń uwzględnia poziom wiedzy użytkownika sieci o dokonywanych zmianach w jej strukturze w różnych momentach. Dalsze badania nad ostateczną formą modelu powinny dotyczyć m.in. następujących problemów:

- uwzględnienie konsekwencji innych możliwych wyborów podejmowanych przez podróżnych, np. rezygnacja z podróży, przyspieszenie momentu wyjazdu, wybór innego miejsca docelowego czy środka transportu,
- wyrażenie skutków zamknięć w innych aspektach, np. ekonomicznym, środowiskowym, organizacyjnym, funkcjonalnym,
- zróżnicowanie efektów zamknięć ulicy w zależności od grup użytkowników i typu podróży,
- uwzględnienie zmienności popytu w czasie,
- ocena czasu przemieszczania różnymi drogami w sieci zatłoczonej w sytuacji zamknięcia,
- analiza wpływu różnych sposobów informowania podróżnych na ich zachowania komunikacyjne,
- rozszerzenie zagadnienia na ruch towarowy,
- uwzględnienie zamknięcia węzła, szczególnie w przypadku, gdy integruje on różne wzajemnie zależne podsystemy transportu funkcjonujące w mieście,
- kształtowanie ruchu w sieci w sytuacji jednoczesnego zamknięcia kilku elementów sieci miejskiej,
- rozważanie konsekwencji zamknięć z punktu widzenia użytkowników dróg, na które zostaje przeniesiony ruch z elementu zamykanego,
- ocena niezawodności danego elementu sieci,
- określenie wykorzystania różnych dróg alternatywnych w czasie zamknięcia,
- analiza konsekwencji zamknięcia w sytuacji braku dróg alternatywnych,
- ocena konsekwencji zamknięć ulic przy założeniu różnych funkcji dyfuzji informacji,
- możliwości zastosowania nowoczesnych technik badawczych, np. teorii zbiorów rozmytych i algorytmów genetycznych.

Wymienione zagadnienia nie wyczerpują wszystkich aspektów, które wiążą się z kompleksowym badaniem skutków zamknięć różnych elementów sieci miejskiej.

Streszczenie

W gęstych sieciach miejskich charakteryzujących się wysokim stopniem obciążenia ruchem zmiany w strukturze sieci mogą w pewnych warunkach powodować wzrost czasu podróży użytkowników, co w konsekwencji prowadzi do spadku jakości funkcjonowania całego systemu. W artykule przedstawiono model zachowania podróżnych w sytuacji zamknięcia ulicy w przypadku możliwości przeniesienia ruchu na drogi alternatywne. W modelu uwzględniono oszacowanie poziomu wiedzy użytkowników o aktualnych zakłóceniach występujących w sieci miejskiej.

Słowa kluczowe: gęste sieci miejskie, zamknięcie ulicy, czas podróży, modelowanie ruchu, zachowania komunikacyjne podróżnych.

Travel behavior modeling under conditions of street closure in dense urban networks**Abstract**

The main task of transport system in the city is to provide the proper level of quality of traveling. Dense urban network are usually overloaded by traffic. Hence, under certain conditions, any change in network structure may be the reason of an increase in travel time of users, which in turn leads to a decline in the quality of the entire system. The paper presents a model of travel behavior under condition of street closure in the case of possibilities of traffic assignment into alternative routes. The significant problem in such formulated model is to assess the level of knowledge of particular traveler about current disruptions in network structure.

Key words: dense urban network, street closure, travel time, travel modeling, travel behavior.

LITERATURA

- [1] Adamski A.: Inteligentne Systemy Transportowe: sterowanie, nadzór i zarządzanie. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2003.
- [2] Bonsall P. W.: Traveller Behaviour: Decision-making in an Unpredictable World. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations*, no 8(1), pp.45-60.
- [3] Cascetta E.: *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. 2nd Edition. Springer Optimization and Its Application, Vol.29. New York 2009.
- [4] Chen A., Yang C., Kongsomsaksakul S., Lee M.: Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*, vol. 7, no. 3, pp.241-256, 2007.
- [5] Ciesielski M.: Koszty kongestii transportowej w miastach. *Zeszyty Naukowe – seria II, nr 87*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań 1986.
- [6] Deo, N.: *Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce*. PWN, Warszawa 1980.
- [7] Dobiecki A., Siewierski J.: *Podstawowe zasady organizacji ruchu*. Poradnik Organizatora Ruchu Drogowego, WKiŁ, Warszawa 1980.
- [8] Dorosiewicz S.: *Potoki ładunków w sieciach transportowych*. Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2010.
- [9] Ford L.R., Jr., Fulkerson D.R.: *Przepływy w sieciach*. PWN, Warszawa 1969.
- [10] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2008.
- [11] Huang H.-J., Li Z.-Ch.: A multiclass, multicriteria logit-based traffic equilibrium assignment model under ATIS. *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, pp.1464-1477, 2007.
- [12] Jacyna M.: Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych. *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej*, s. TRANSPORT, z.47, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [13] Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [14] Jenelius E.: Incorporating Dynamics and Information in a Consequence Model for Road Network Vulnerability Analysis, presented at The Third International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), The Hague, the Netherlands 2007.
- [15] Jenelius E., Petersen T., Mattsson L.-G.: Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A* 40 (vol. 7), pp. 537-560, 2006.

- [16] Khattak A. J., Schofer J. L., Koppelman F. S.: Commuters' Enroute Diversion and Return Decisions: Analysis and Implications for Advanced Traveler Information Systems. *Transportation Research A* 27A(2): 101-111, 1993.
- [17] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania. WNT, Warszawa 1978.
- [18] Lappin J., Bottom J.: Understanding and Predicting Traveler Response to Information: A Literature Review. US. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2001.
- [19] Leszczyński J.: Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [20] Nicholson A. J., Dalziell E.: Risk evaluation and management: a Road network reliability study. [in:] Mell M. G. H., Iida Y.: The network reliability of transport. *Proceedings of the 1st Sym. On Transportation Network Reliability (INSTR)*. Pergamon, New York, pp.45-59, 2003.
- [21] Nicholson A. J., Du Z. P.: Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model. *Transportation Research Part B* 31 (vol. 3), pp.209-223, 1997.
- [22] Oppenheim N.: Urban travel demand modeling. Wiley, New York 1995.
- [23] Ortuzar J., Willumsen L. G.: Modelling transport. 3rd Edition. Wiley, New York 2009.
- [24] Rodrigue J.P., Comtois C., Slack B.: *The Geography of Transport Systems*, Second Edition, New York: Routledge 2009.
- [25] Rudnicki A.: Jakość komunikacji miejskiej. Zeszyt Naukowo-Techniczny SITK RP o/Kraków, seria: Monografie Nr 5 (Zeszyt 71), Kraków 1999.
- [26] Rydzkowski W., Wojewódzka-Król K.: *Transport*. PWN, Warszawa 2008.
- [27] Starowicz W.: Kształtowanie jakości usług przewozowych w miejskim transporcie zbiorowym. Szczecin, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego 2001.
- [28] Szarata A.: Ocena efektywności funkcjonalne parkingów przesiadkowych (P+R). Praca doktorska w Instytucie Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
- [29] Szymczak M.: *Logistyka miejska*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań 2008.
- [30] Tarapata Z.: Algorytmy komputerowego wspomaganie planowania przemieszczania równoległego kolumn. Rozprawa doktorska w Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 1998.
- [31] Taylor M.A.P., D'Este G.M.: Critical infrastructure and transport network vulnerability: Developing a method for diagnosis and assessment. *Proceedings of the Second International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)* eds. Nicholson A., Dantas A., Christchurch, New Zealand, pp.96-102, 2004.
- [32] Tundys B.: *Logistyka miejska – koncepcje, systemy, rozwiązania*. Centrum Doradztwa i Informacji Difin sp. z o.o., Warszawa 2008.
- [33] Ustawa z dn. 21 marca 1985 o drogach publicznych. Dz.U.1985 nr 14 poz.60.
- [34] Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Polska Akademia Nauk – oddział w Katowicach, Komisja Transportu. Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.
- [35] Wyszomirski O.: *Transport miejski. Ekonomika i organizacja*. Gdańsk, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 2008.
- [36] Żak J.: Modelowanie i optymalizacja wielokryterialna funkcjonowania systemów transportowych komunikacji miejskiej. Politechnika Poznańska, rozprawa doktorska na Wydziale Maszyn Roboczych i Pojazdów, Poznań, 1995.
- [37] Żochowska R.: Algorytm koordynacji zamknięć drogowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.48*, Gliwice 2003.
- [38] Żochowska R.: Koordynacja zamknięć w gęstych sieciach drogowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.41*, Gliwice 2000.
- [39] Żochowska R.: Modele wyboru drogi wykorzystywane w budowie dynamicznych macierzy podróży. Materiały konferencyjne na V Międzynarodową Konferencję Naukowo-Techniczną „Systemy Logistyczne – teoria i praktyka”. Waplewo 6 - 9 września 2011. *Logistyka* 4/2011, Wydawnictwo ILiM w Poznaniu, s.1026 – 1036.
- [40] Żochowska R.: Modelowanie wyboru trasy w gęstych sieciach miejskich. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 71*, Gliwice 2011, s.97-108.
- [41] Żochowska R.: Optymalizacja zamknięć ulic w złożonych sieciach transportowych. Rozprawa doktorska na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [42] Żochowska R.: Optymalizacja zamknięć w złożonych sieciach drogowych. Materiały konferencyjne I Międzynarodowej Konferencji Naukowej nt. „Telematyka Systemów Transportowych TST'01”, Ustroń 2001.
- [43] Żochowska R.: Optymalne rozmieszczenie zamknięć w złożonej sieci drogowej. Materiały konferencyjne IV Konferencji Naukowo-technicznej nt. „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 2003.

- [44] Źochowska R.: Organizacja ruchu w czasie zamknięć drogowych. Materiały konferencyjne I Konferencji Naukowo-technicznej nt. „Systemy transportowe. Teoria i praktyka”, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.47, Gliwice 2003.
- [45] Źochowska R.: Wyznaczanie opóźnień dla różnych wariantów organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa drogowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.50, Gliwice 2003.
- [46] Źochowska R.: Wyznaczanie opóźnień dla grupy zamknięć jednoczesnych w sieciach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.56, Gliwice 2004.
- [47] Źochowska R., Karoń G., Sobota A.: Modelowanie procesów decyzyjnych podróży w transporcie publicznym. Materiały konferencyjne VIII Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań – Rosnówko 2011, s. 113 – 144.