

Modelowanie potoków ruchu w sieci miejskiej dla potrzeb analizy zakłóceń

1. WPROWADZENIE

Modelowanie ruchu w sieciach transportowych w obszarach miejskich jest szczególnie złożone. Taki obszar jest bowiem miejscem silnego oddziaływania różnych czynników społeczno-gospodarczych, technicznych, organizacyjnych i ekonomicznych. Wpływa to na funkcjonowanie poszczególnych podsystemów transportowych, które z jednej strony charakteryzują się odrębnymi cechami, a z drugiej – są od siebie zależne. Oddziaływanie to dotyczy również potoków ruchu przepływających przez sieć transportową. W takiej sytuacji nawet drobne zmiany w infrastrukturze transportowej mogą być przyczyną zakłóceń i zmian w strukturze ruchu nie tylko całego miasta, ale również jego otoczenia.

Wielowymiarowość problematyki wymaga więc wprowadzenia pojęcia szerszego niż system transportowy. Przy analizie oddziaływań zakłóceń wygodniej jest stosować pojęcie systemu miejskiego, obejmującego nie tylko występujące w rzeczywistości obiekty związane z infrastrukturą transportową, ale również powiązania o charakterze ekonomicznym, prawnym, gospodarczym, organizacyjnym, itp. Taki system uwzględnia również charakterystyki społeczno-demograficzne oraz zagospodarowanie przestrzenne badanego obszaru, a jego struktura przedstawiona jest w postaci sieci miejskiej [36]. Sieć transportowa stanowi element sieci miejskiej, zawierającej również m.in. węzły ciężenia poszczególnych rejonów transportowych, które odwzorowują zagregowane lokalizacje określonych aktywności lub działalności gospodarczych. Sposób ich powiązania z systemem transportowym, definiowany określonym poziomem dostępności, wpływa na kształtowanie się ruchu w analizowanym obszarze miejskim.

Potoki ruchu przepływające przez sieć miejską narażone są na oddziaływanie różnego typu zakłóceń [39, 40]. Pojęcie zakłócenia w teorii potoku ruchu może być definiowane w różnorodny sposób. W pracy [32] J. Wicher rozpatruje zakłócenie ruchu jako ciąg zdarzeń prowadzących do stanu, w którym ruch nie może być kontynuowany według uprzednich założeń. Przykładem gwałtownego zakłócenia ruchu jest kolizja drogowa. Podobnie rozumieją to pojęcie Autorzy pracy [27], gdzie źródłem zakłócenia jest zdarzenie, mające wpływ na zmianę parametrów ruchu pojazdów. W ogólnym ujęciu zakłócenie może również dotyczyć zmian w strukturze społecznej, gospodarczej czy funkcjonalnej systemu transportowego. W systemie złożonym, jakim niewątpliwie jest system miejski, zakłócenie rozumiane jest jako odchylenie rzeczywistych warunków funkcjonowania systemu od warunków normalnych² [1]. W sieci miejskiej takie sytuacje mogą być potencjalną przyczyną zaburzenia płynności ruchu oraz zmian w procesach decyzyjnych użytkowników systemu transportowego dotyczących sposobu realizacji przemieszczeń [38]. Zakłócenia mają więc zarówno bezpośredni, jak i pośredni wpływ na sprawność ruchu w sieci miejskiej.

Pierwsze próby matematycznego opisu przepływu potoków ruchu w sieci transportowej sięgają lat 20. XX wieku. Wtedy to Frank Knight [16] opisał stan równowagi potoku ruchu, który został sformalizowany przez J.G. Wardropa w postaci pierwszej i drugiej zasady równowagi dopiero w 1952 roku [31]. Jednak pomimo znacznego postępu techniki i możliwości zastosowania coraz wydajniejszych narzędzi informatycznych, jak dotąd nie opracowano uniwersalnej teorii, która mogłaby w sposób kompleksowy opisywać rzeczywiste warunki ruchu. Stosowane obecnie modele budowane są zarówno na podstawie metod empirycznych, jak i teoretycznych. Po odpowiedniej weryfikacji są one następnie wykorzystywane do przeprowadzania różnego typu analiz i opracowywania prognoz ruchu, uwzględniających zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym obszaru, podziale modalnym czy też stopniu napełnienia środków

¹ renata.zochowska@polsl.pl

² Warunki normalne funkcjonowania systemu złożonego są pewnego rodzaju idealizacją warunków rzeczywistych. W praktyce określone są jako warunki najbardziej typowe dla systemu danej klasy [1].

transportu. Celem takich badań jest identyfikacja miejsc szczególnie podatnych na zakłócenia, ocena oddziaływania tych zakłóceń na inne elementy systemu transportowego miasta i jego otoczenia oraz wybór właściwych narzędzi zarządzania ruchem zmniejszających uciążliwości wynikające z tych zakłóceń.

2. SPOSOBY MODELOWANIA PRZEPIYWU POTOKU RUCHU W SIECIACH TRANSPORTOWYCH

Opis przepływu potoku ruchu jest złożony i ma charakter nieliniowy, silnie uwarunkowany oddziaływaniem pomiędzy poszczególnymi jednostkami potoku. Ze względu na indywidualne reakcje użytkowników sieci transportowej, do odwzorowania struktury ruchu i jego dynamiki nie wystarczają jedynie analogie nawiązujące do zasad obowiązujących w naukach mechanicznych. Należy również sięgać po modele wykorzystywane w opisie zachowań ludzkich stosowane w socjologii, demografii czy psychologii. Jest to szczególnie istotne w przypadku dużego zagęszczenia ruchu, gdzie procesy decyzyjne użytkowników w odniesieniu do sposobu przemieszczania odgrywają istotną rolę.

Ogólnie modele opisujące przepływ potoku ruchu można podzielić na dwie grupy:

- modele opisujące rozłożenie potoków ruchu w sieci transportowej,
- modele opisujące przepływ potoków ruchu przez pojedyncze elementy sieci transportowej.

2.1. Modele opisujące rozłożenie potoku ruchu w sieci transportowej

Modele należące do pierwszej grupy stosowane są na etapie planowania potoków ruchu i uwzględniają powiązania pomiędzy stroną popytową a podażową systemu transportowego miasta [3, 25]. Popyt na transport kształtowany jest na podstawie przestrzennego rozproszenia elementów podsystemu aktywności (gospodarstw domowych oraz obiektów działalności gospodarczej), wywołującego potrzeby transportowe i w efekcie - podróże osób oraz przewozy ładunków. Poszczególni użytkownicy systemu transportowego podejmują decyzje co do sposobu przemieszczania, które mogą mieć charakter długoterminowy (np. posiadanie prawa jazdy i środka transportu) oraz krótkoterminowy (np. moment rozpoczęcia przemieszczania, jego miejsce docelowe, wykorzystywany środek transportu oraz droga przemieszczania). Efektem wyborów dokonywanych przez użytkowników są zagregowane potoki ruchu w sieci transportowej składające się z pojazdów przewożących osoby oraz ładunki. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe sposoby modelowania popytu [3].

Tabela 1. Klasyfikacja modeli popytu

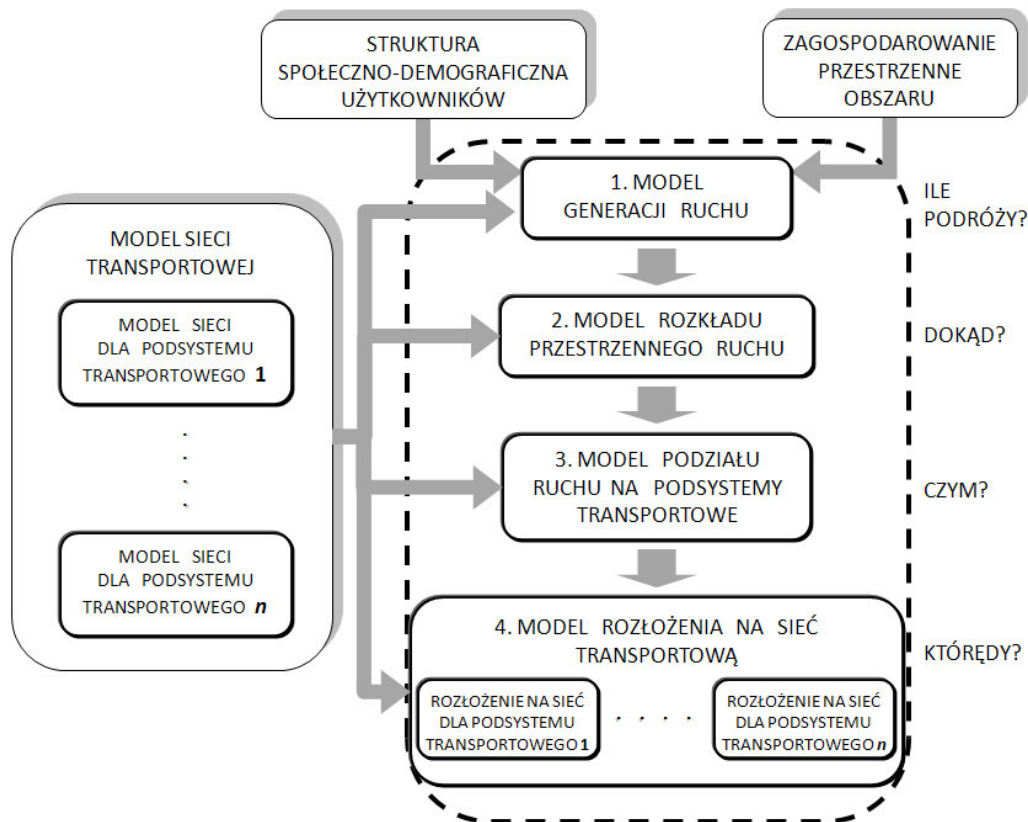
TYP MODELU	GŁÓWNE ZAŁOŻENIA
modele oparte na pojedynczych przemieszczeniach (ang. <i>trip-based travel-demand models</i>)	decyzje o sposobie realizacji każdego pojedynczego przemieszczenia są podejmowane przez użytkowników systemu transportowego niezależnie od decyzji co do innych przemieszczeń występujących w tym samym lub innym łańcuchu przemieszczeń
modele oparte na łańcuchach przemieszczeń (ang. <i>trip-chaining travel-demand models</i>)	decyzje o sposobie realizacji przemieszczeń należących do jednego łańcucha są zależne
modele oparte na aktywności użytkowników sieci (ang. <i>activity-based demand models</i>)	decyzje związane z realizacją przemieszczenia zależą od potrzeb transportowych oraz organizacji zajęć w ciągu dnia

Zródło: opracowanie własne na podstawie [3].

Modele popytu transportowego (ang. *travel demand models*) wykorzystywane w planowaniu potoków ruchu w miastach składają się z kilku modeli cząstkowych. W klasycznym ujęciu, opartym na podstawach teorii mikroekonomicznej (np. [12, 22]), obejmuje on cztery części, które jednocześnie są odwzorowaniem matematycznym kolejnych etapów powstawania ruchu w sieci miejskiej. Kolejno są to następujące modele cząstkowe [3, 15, 17, 25]:

- model generowania ruchu (ang. *trip generation model*),
- model rozkładu przestrzennego ruchu (ang. *trip distribution model*),
- model podziału zadań przewozowych na środki transportowe (ang. *modal split model*),
- model rozłożenia ruchu na sieć transportową (ang. *traffic assignment model*).

Klasyczne podejście zakłada, że pomimo pewnych sprzężeń zwrotnych, poszczególne modele cząstkowe realizowane są w sposób sekwencyjny. Oznacza to, że na każdym z etapów wykorzystuje się wyniki uzyskane w modelu poprzednim, co schematycznie przedstawiono na rysunku 1. W literaturze można jednak spotkać wiele różnorodnych modyfikacji takiego układu, polegających na agregacji niektórych etapów albo zmianie kolejności ich przeprowadzania (m.in. [3, 6, 25]).



Rys. 1. Schematyczne ujęcie klasycznego (czterostopniowego) modelu popytu

Źródło: Opracowanie własne.

Czterostopniowy model popytu opiera się na podejściu behawioralnym zakładającym, że użytkownicy zachowują się w sposób racjonalny przy podejmowaniu decyzji o potrzebie, czasie, miejscu i sposobie przemieszczania w sieci miejskiej. W takim ujęciu funkcja celu definiowana z punktu widzenia użytkownika jest różnicą pomiędzy korzyściami, wynikającymi z połączenia dwóch działalności realizowanych w odrębnych lokalizacjach geograficznych, a kosztami realizacji samego przemieszczenia (np. koszt paliwa, czas podróży, itp.) [28]. Istotne jest zróżnicowanie tej funkcji z punktu widzenia poszczególnych grup użytkowników. Oznacza to, że każdy z nich wybiera określony punkt docelowy, środek transportu oraz drogę, po której będzie odbywać się przemieszczenie w taki sposób, aby różnica pomiędzy jego subiektywnymi korzyściami a kosztami była maksymalna [28]. W ujęciu transportowym trudno jest jednak oceniać korzyści wynikające z realizacji przemieszczania dla poszczególnych użytkowników. W związku z tym w analizach często zostają one pomijane, a funkcja celu wyrażana jest w postaci uogólnionego kosztu przemieszczania. Oznacza to, że każdy z użytkowników dąży do minimalizacji ogólnie pojętych kosztów związanych z realizacją przemieszczania [37].

Jedną z zasadniczych wad klasycznych modeli popytu jest utrata wielu szczegółowych informacji o sposobie realizacji poszczególnych przemieszczeń na skutek agregacji do poziomu podróży. W związku z tym w modelowaniu potoków ruchu coraz częściej wykorzystuje się modele oparte na aktywnościach, w których uwzględnia się zależności pomiędzy pojedynczymi łańcuchami przemieszczeń realizowanymi przez poszczególne osoby lub gospodarstwa domowe w ciągu doby [3]. Modele te bazują głównie na założeniach szwedzkiej geografii czasu opracowanej przez T. Hagerstranda [8] w latach 70. ubiegłego stulecia, podkreślającej znaczenie ograniczeń czasowych i przestrzennych w dostępności transportowej, na podstawie których wykreślana jest tzw. przestrzeń potencjalnych ścieżek (ang. *potential path space*). Dużą zaletą tych behawioralnych modeli jest możliwość uwzględniania wielomotywacyjnych podróży

realizowanych przez użytkowników systemu transportowego z rozróżnieniem ich cech społeczno-ekonomicznych, płci, wieku lub grupy etnicznej. Jednak opis przemieszczeń oparty na geografii czasu jest utrudniony ze względu na problemy z uzyskaniem dokładnych danych dotyczących harmonogramu dziennych zajęć użytkownika sieci. Modele te charakteryzuje również duża złożoność w przypadku przyjęcia założenia o zmiennych prędkościach ruchu.

Na uwagę zasługuje również wykorzystanie modeli agentowych w modelowaniu potoków ruchu. W takich modelach pojedyncze gospodarstwa domowe reprezentowane są przez tzw. agentów, którzy mogą podejmować samodzielne decyzje co do sposobu zachowania. Takie podejście można stosować dla różnych horyzontów czasu, począwszy od długoterminowych decyzji odnoszących się do miejsca zamieszkania, poprzez średnioterminowe decyzje związane z planowaniem aktywności realizowanych w ciągu dnia, a skończywszy na krótkoterminowych decyzjach podejmowanych podczas przemieszczania się w sieci miejskiej [23].

2.2. Modele opisujące przepływ potoku ruchu przez pojedyncze elementy sieci transportowej

Modele opisujące przepływ potoku ruchu przez pojedyncze elementy sieci transportowej nazywane są również modelami rozprzestrzeniania się potoków ruchu [21]. Odcinki sieci w obszarze miejskim są obciążone potokiem ruchu, który można zdekomponować na pojedyncze strumienie ruchu. Analiza strumienia ruchu przepływającego przez pojedyncze elementy sieci miejskiej sprowadza się głównie do określenia zależności empirycznej pomiędzy podstawowymi trzema jego charakterystykami: intensywnością, gęstością i prędkością. Relacje pomiędzy tymi wielkościami dla ruchu jednorodnego ujmowane są w postaci tzw. równania stanu strumienia ruchu. Postać funkcyjna opisująca badane zależności jest podobna dla wszystkich rodzajów dróg, jednak na dokładny kształt krzywych wpływają rzeczywiste warunki drogowe i ruchowe, specyficzne dla danego odcinka. Wśród najistotniejszych czynników wpływających na postać fundamentalnych zależności empirycznych wymienia się m.in.: strukturę strumienia ruchu, zachowania kierujących, wielkości odstępów czasu między kolejnymi pojazdami, parametry geometryczne i widoczność drogi, warunki atmosferyczne, zagospodarowanie otoczenia dróg oraz czynniki związane z techniką pomiarową [7].

W tabeli 2 przedstawiono klasyfikację tego typu modeli jako kryterium podziału przyjmując poziom agregacji. Szczegółowy opis każdego z tych typów modeli można znaleźć m.in. w [7, 13, 21].

Tabela 2. Klasyfikacja modeli rozprzestrzeniania się potoków ruchu

TYP MODELU	GŁÓWNE ZAŁOŻENIA	PRZYKŁADY
makroskopowe	<ul style="list-style-type: none"> – najwyższy poziom agregacji, – najniższy poziom dokładności, – analogie do mechaniki płynów. 	<ul style="list-style-type: none"> – model hydrodynamiczny Lighthill’a i Whithama, – model Newell’a, – model Richardsa, – model Payne’a.
mezoskopowe	<ul style="list-style-type: none"> – wysoki poziom agregacji, – niski poziom dokładności, – analogie do kinematyki gazów. 	<ul style="list-style-type: none"> – model klastrowy Ben-Akiva, – model rozkładu odstępów Branstona, – model kinetyczny Prigogine’a i Hermana.
mikroskopowe	<ul style="list-style-type: none"> – niski poziom agregacji, – wysoki poziom dokładności, – opis oddziaływania pomiędzy pojazdami w strumieniu ruchu. 	<ul style="list-style-type: none"> – model Chandlera, – model Kometani i Sasaki, – model Gazis’a, – model Treibera i Helbinga, – model psycho-fizjologiczny Wiedemanna, – model automatu komórkowego Nagela-Schrackenberga, – model kolejkowy Heidemanna.
submikroskopowe	<ul style="list-style-type: none"> – najniższy poziom agregacji, – najwyższy poziom dokładności, – opis funkcjonowania pojedynczych pojazdów. 	<ul style="list-style-type: none"> – model van Arem’a, – model Minderhoud’a, – model Ludmanna.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [21].

Dobór wielkości opisujących ruch zmienia się w zależności od potrzeb badań. Przykładowo dla planowania istotne mogą być takie ilościowe charakterystyki potoku ruchu, jak czas przemieszczania się potoku ruchu, jego równomierność i struktura [14]. Z kolei z punktu widzenia sterowania ważne są m.in. intensywność ruchu, sposób organizacji (np. ruch całkowicie zorganizowany, samoorganizujący się i sytuacje pośrednie), sposób regulacji ruchu (ruch całkowicie lub częściowo regulowany oraz ruch nieregulowany) czy też elastyczność organizacji ruchu [30]. Warunki ruchu można opisać również w sposób jakościowy za pomocą tzw. poziomów swobody ruchu, które stanowią miarę uwzględniającą odczucia kierowców i innych użytkowników dróg.

Według J. Wocha [33] miejscami powstawania zakłóceń są węzły krytyczne sieci, gdzie rezerwy przepustowości tkwią w potokach płynnych, towarzyszących potokom zakłóconym. Odpowiednia zmiana struktury ruchu w węzłach krytycznych może prowadzić do poprawy zdolności przepustowej i zmniejszenia całkowitych strat czasu w sieci. W związku z tym ważna jest dokładna identyfikacja miejsc zakłóceń na poziomie mikroskopowym. Wykorzystując cechę hierarchiczności sieci niektóre węzły można zdekomponować na mniejsze części, nazywane węzłami elementarnymi [33]. Dopiero analiza na poziomie węzłów elementarnych daje właściwą ocenę stopnia zakłócenia potoku ruchu w sieci transportowej.

Ważną miarą efektywności węzłów sieci transportowej jest płynność ruchu [26], odpowiadająca oczekiwanej liczbie jednostek potoku ruchu, które nie zostaną zakłócone w określonym węźle. Związek pomiędzy płynnością ruchu a intensywnością dla strumienia ruchu został opracowany przez J. Wocha [33] na podstawie tzw. modelu ruchomego bufora, który w znacznej mierze bazuje na pracach F. Haight'a [9] oraz D. Heidemanna [10]. Kolejka według F. Heighta to stan, w którym występuje ścisła zależność pomiędzy pojazdami w ruchu drogowym, polegająca na tym, że straty czasu dla określonego pojazdu wywołane są przez pojazd poprzedni, a ich wielkość zależna jest od różnicy prędkości pomiędzy nimi. Prowadzi to do współzależności odstępów pomiędzy pojazdami. Z kolei ruch płynny definiowany jest według Heighta jako kolejki pojazdów tworzące sekwencje niezależnych odstępów. W takiej sytuacji długość kolejki opisana jest rozkładem geometrycznym. Podobne założenia przyjął D. Drew, który wyprowadził zależności matematyczne bazując również na rozkładzie geometrycznym [5]. Ujęcie kolejkowe dla opisu modelu maksymalnej płynności ruchu zaproponowano również w pracach [10, 11].

Do opisu ruchu w sieci transportowej stosuje się również modele z zakresu teorii gier, sieci Petri'ego czy metody sztucznej inteligencji. Ciekawe podejście przedstawiła J. Żak w pracy [34], gdzie do modelowania procesów transportowych stosuje oryginalną metodę sieci faz z zastosowaniem teorii kolejek. Takie modele również mogą mieć zastosowanie w odwzorowaniu przepływu potoków ruchu.

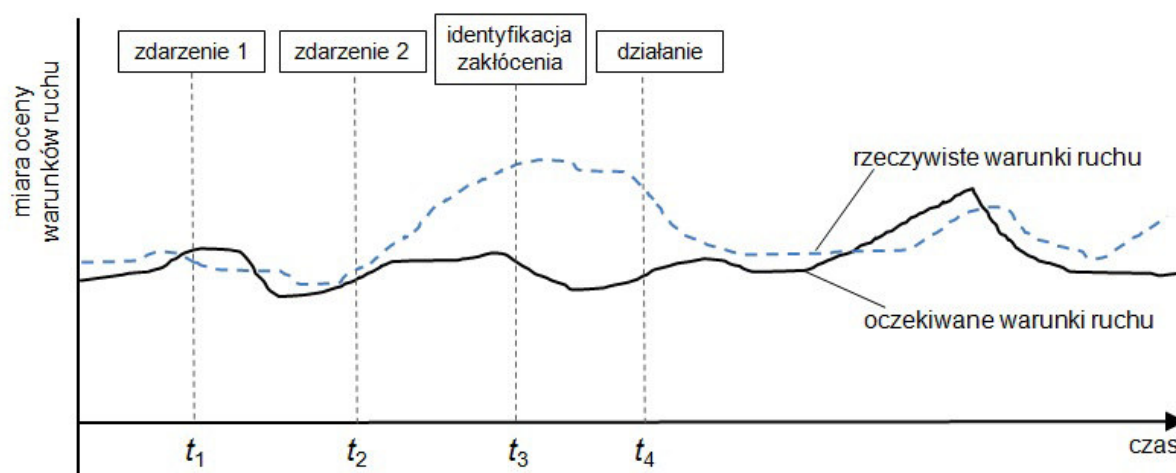
3. ODWZOROWANIE PRZEMIESZCZANIA POTOKU W SIECI MIEJSKIEJ DLA POTRZEB ANALIZY ZAKŁÓCEŃ

W modelach statycznych, wykorzystywanych często w planowaniu potoków ruchu w obszarach zurbanizowanych, zakłada się, że cały proces przepływu potoku w sieci miejskiej z miejsca początkowego do końcowego odbywa się w jednym odpowiednio długim przedziale czasu. Analiza zakłóceń i ocena ich oddziaływania wymaga jednak podejścia dynamicznego, które nie tylko uwzględnia zmienność popytu w czasie, ale również wychwytuje nietypowe odchylenia pomiędzy rzeczywistymi (zmierzonymi) a oczekiwanymi (prognozowanymi) wartościami charakterystyk potoku ruchu. Takie różnice mogą być traktowane jako potencjalne zakłócenia i powinny być dokładniej zbadane.

Zdarzenie określonego typu wywołuje w danej chwili zakłócenie, jeżeli występuje duża podatność systemu transportowego na tego typu zdarzenia [40]. Należy przez to rozumieć występowanie w tym właśnie momencie szeregu czynników i uwarunkowań, powodujących, że prawdopodobieństwo wystąpienia zakłócenia na skutek zajścia zdarzenia określonego typu jest duże. Warto zauważyć, że nawet podobne zdarzenia występujące w różnych chwilach czasu, odpowiadających różnym stanom systemu transportowego, mogą wywołać odmienne poziomy zakłóceń. Przykładowo długoterminowe roboty drogowe w początkowym okresie mogą wywoływać zakłócenia o silnym oddziaływaniu, a następnie - po okresie adaptacji użytkowników do tej sytuacji - zakłócenia znacznie słabsze. Zdarzenie takie może również w zróżnicowany sposób oddziaływać na poszczególne grupy użytkowników. Inaczej na to samo zdarzenie mogą reagować osoby posiadające informację o aktualnych warunkach ruchu w sieci, niż ci, którzy takiej

wiedzy nie mają. Ponadto, dzięki odpowiedniemu zarządzaniu ruchem, zdarzenie to może nie być w ogóle odczuwane przez użytkowników systemu transportowego.

W warunkach rzeczywistych może dochodzić także do sytuacji, kiedy pojedyncze zdarzenie nie wywoła zakłócenia, a dopiero odpowiedni splot kilku zdarzeń spowoduje wystąpienie uciążliwości, wymagających odpowiednich działań ze strony organów zarządzających ruchem. Na rysunku 2 przedstawiono hipotetyczną sytuację występowania dwóch zdarzeń i ich wpływu na warunki ruchu. W tym przypadku zakłócenie identyfikowane jest na podstawie odchylenia pomiędzy wartością oczekiwaną i rzeczywistą określonej miary warunków ruchu w sieci drogowej (np. straty czasu, długość kolejki, itp.). Zdarzenie 1, które zaszło w chwili t_1 nie spowodowało znaczącej zmiany warunków ruchu. Stąd nie zostało zidentyfikowane jako zakłócenie. Dopiero zajście zdarzenia 2 doprowadziło do sytuacji, kiedy odchylenie pomiędzy wartością rzeczywistą a oczekiwaną wybranej miary warunków ruchu zaczęło rosnąć i w chwili t_3 przekroczyło wartość graniczną, co zostało zarejestrowane jako zakłócenie. Taka informacja spowodowała uruchomienie określonych działań na poziomie operacyjnym, czego skutkiem był powrót do stanu sprzed zajścia tych zdarzeń. Różnica między momentami t_4 i t_3 jest czasem reakcji systemu transportowego na zakłócenie.



Rys. 2. Przykładowy sposób oddziaływania zdarzeń na system transportowy

Źródło: opracowanie własne.

Wybrana strategia zarządzania nie powinna dotyczyć jedynie poziomu operacyjnego, ale także także identyfikować przyczyny zakłóceń na poziomie taktycznym, a nawet strategicznym. Należy również brać pod uwagę czynniki zewnętrzne, które są silnie powiązane z funkcjonowaniem całego systemu miejskiego [24]. Ponadto zakłócenie powinno być rozpatrywane zarówno z punktu widzenia efektywności sieci i całego systemu transportowego miasta, jak i percepcji jego użytkowników. Odpowiada to założeniom modeli normatywnych i deskryptywnych prezentowanych w wielu publikacjach naukowych (np. [14, 19, 28]).

Dynamiczne ujęcie zagadnienia wymaga wprowadzenia odpowiedniego modelu czasu. Założono więc, że cały okres analizy został podzielony na ustaloną liczbę przedziałów o jednakowej długości, oznaczonej jako θ . Zbiór T zawiera numery kolejnych przedziałów czasu, tj.:

$$T = \{t : t = 1, \dots, \bar{T}\} \quad (1)$$

gdzie \bar{T} oznacza liczbę wszystkich przedziałów (liczebność zbioru T). Długość przedziału czasu o numerze $t \in T$ zależy od szczegółowości analiz.

Ponadto przyjęto, że na zbiorze T zadane jest odwzorowanie:

$$\tau t : T \longrightarrow \mathbb{R}^+ \quad (2)$$

przy czym $\tau t(t) \in \mathbb{R}^+$ ma interpretację wartości na osi czasu rzeczywistego odpowiadającej momentowi zakończenia przedziału czasu o numerze $t \in T$. W modelu czasu przyjmuje się, że moment rozpoczęcia pierwszego przedziału czasu jest ustalony. Ponadto założono, że moment rozpoczęcia każdego kolejnego przedziału jest równy momentowi zakończenia przedziału poprzedniego. Każdy przedział czasu o numerze $t \in T$ można więc określić jako: $\langle \tau t(t) - \theta, \tau t(t) \rangle$ lub $\langle \tau t(t-1), \tau t(t-1) + \theta \rangle$.

Struktura analizowanego miasta przedstawiana jest najczęściej w postaci zbioru mniejszych jednostek osadniczych, wydzielonych na jego terenie, zwanych rejonami transportowymi. Dla uproszczenia przyjmuje się założenie, że wszystkie czynniki ruchotwórcze skoncentrowane są w jednym punkcie w przestrzeni, który nazywany jest węzłem ciężenia i znajduje się w środku ciężkości (centroidzie) każdego rejonu. Stanowi on miejsce generowania potrzeb transportowych. Natomiast struktura sieci miejskiej może być opisana z wykorzystaniem teorii grafów [4, 14, 19, 36] jako:

$$G = \langle W, L \rangle, \quad (3)$$

gdzie:

W - zbiór numerów wierzchołków grafu G , będący odwzorowaniem zbioru wszystkich węzłów sieci miejskiej, tj.:

$$W = \{w : w = 1, \dots, \bar{W}\}, \quad (4)$$

gdzie \bar{W} oznacza liczebność zbioru W ,

L - zbiór łuków grafu G , będący odwzorowaniem zbioru połączeń między wierzchołkami o numerach $w, w' \in W$, tj.

$$L = \{(w, w') : (w, w') \in W \times W, w \neq w'\}. \quad (5)$$

Zbiór numerów wierzchołków W można zdekomponować w zależności od roli, jaką pełnią one w przepływie potoku ruchu na trzy podzbiory [14]:

A - zbiór numerów wierzchołków, stanowiących odwzorowania węzłów ciężenia rejonów transportowych, w których powstaje potok ruchu (miejsca początkowe przemieszczeń, źródła potoku ruchu, punkty nadania), tj.

$$A = \{a : a \in W\}, \quad (6)$$

B - zbiór numerów wierzchołków, stanowiących odwzorowania węzłów ciężenia rejonów transportowych, w których zanika potok ruchu (miejsca końcowe/docelowe przemieszczeń, ujścia potoku ruchu, punkty przeznaczenia/odbioru), tj.

$$B = \{b : b \in W\}, \quad (7)$$

V - zbiór numerów wierzchołków pośrednich, stanowiących odwzorowania węzłów sieci transportowej, tj.

$$V = \{v : v, v' \in W; v \neq v'\}. \quad (8)$$

Zbiory te są parami rozłączne, tzn.:

$$A \cap V = \emptyset, \quad B \cap V = \emptyset, \quad A \cap B = \emptyset \quad (9)$$

oraz spełniony jest warunek:

$$W = A \cup B \cup V. \quad (10)$$

Następnie określono zbiór relacji podróży [14], tj.

$$E = \{(a, b) : (a, b) \in A \times B\}, \quad (11)$$

opisujących związek pomiędzy poszczególnymi węzłami będącymi źródłami potoku ruchu a węzłami stanowiącymi ujście potoku ruchu.

Ponadto przyjęto założenie, że dla każdej relacji $(a, b) \in E$ istnieje przynajmniej jedna droga prosta o numerze p łącząca wyróżnione wierzchołki, rozumiana jako sekwencja nie powtarzających się odcinków, przez które kolejno przepływa potok ruchu. Drogę tę opisano jako:

$$\mathcal{A}(p) = \langle (a, v), (v, \dots), \dots, (\dots, v'), (v', b) \rangle, \text{ gdzie } a \in A, v, \dots, v' \in V, b \in B. \quad (12)$$

Zbiór numerów wszystkich dróg w sieci miejskiej można opisać jako:

$$P = \{p : p = 1, \dots, \bar{P}\}, \quad (13)$$

gdzie \bar{P} oznacza liczebność zbioru P (liczbę wszystkich dróg w sieci miejskiej). Zbiór P można zdekomponować na podzbiory $P^{(a,b)}$ zawierające numery dróg dla każdej z relacji $(a,b) \in E$, tj.:

$$P^{(a,b)} = \{p : p \in P\}, \quad (a,b) \in E, \quad (14)$$

przy czym

$$P = \bigcup_{(a,b) \in E} P^{(a,b)}. \quad (15)$$

Potok ruchu przepływający przez poszczególne elementy sieci miejskiej, tzn. węzły odwzorowane wierzchołkami, których numery są elementami zbioru W oraz odcinki, odpowiadające łukom należącym do zbioru L , jest odwzorowaniem przemieszczania osób i (lub) ładunków w sieci o strukturze opisanej grafem G [14]. Można go również zdefiniować jako „zbiór przypisany do określonego wektora transportowego³ podróży osób, przejazdu osób lub pojazdów oraz przewozu ładunków”. Charakterystyką liczbową potoku ruchu jest wielkość interpretowana jako liczba jednostek potoku ruchu w jednostce czasu. Jako jednostki potoku ruchu można przyjąć zarówno jednostki przewozowe (np. pojazdy), jak i przewożone dobra (np. osoby, ładunki). Przeprowadzając analizy związane ze stroną popytową systemu transportowego⁴ wygodniej jest operować pojęciem tzw. pojazdu umownego o ustalonych parametrach technicznych, które w odpowiedni sposób oddziałują na otoczenie. Pozostałe grupy pojazdów za pomocą współczynników ekwiwalentnych zostają wtedy sprowadzone do wielkości pojazdu umownego [7].

Dla odwzorowania przepływu potoku ruchu przyjęto, że na odpowiednich iloczynach kartezjańskich zadane są następujące odwzorowania, przekształcające elementy tych iloczynów w zbiór $\mathfrak{R}^+ \cup \{0\}$:

$$x : T \times E \longrightarrow \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}, \quad (16)$$

$$x : T \times P \longrightarrow \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}, \quad (17)$$

$$x : T \times L \longrightarrow \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}, \quad (18)$$

przy czym $x(t, (a,b)) \equiv x^{(a,b)}(t) \in \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}$ ma interpretację wielkości potoku ruchu w relacji $(a,b) \in E$ rozpoczynającego przemieszczanie w sieci miejskiej (odpowiadające wyjazdowi z miejsca początkowego odwzorowanego wierzchołkiem o numerze $a \in A$), w przedziale czasu o numerze $t \in T$, $x(t, p) \equiv x^p(t) \in \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}$ ma interpretację wielkości potoku ruchu na drodze o numerze $p \in P$ rozpoczynającego przemieszczanie w sieci miejskiej (odpowiadające wyjazdowi z miejsca początkowego odwzorowanego wierzchołkiem o numerze $a \in A$), a $x(t, (w,w')) \equiv x_{(w,w')}(t) \in \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}$ ma interpretację wielkości potoku ruchu przepływającego przez odcinek odwzorowany łukiem $(w,w') \in L$ w przedziale czasu o numerze $t \in T$. W praktyce wielkość potoku ruchu $x_{(w,w')}(t)$ odpowiada liczbie jednostek potoku zmierzonej w określonym przekroju odcinka⁵ $(w,w') \in L$ w przedziale czasu o numerze $t \in T$. W związku z tym należy pamiętać, że uzyskana w ten sposób wartość $x_{(w,w')}(t)$ jest pewnym oszacowaniem wartości rzeczywistej.

Wielkość potoku ruchu $x^p(j)$ na drodze o numerze $p \in P$ rozpoczynającego przemieszczanie z miejsca początkowego w przedziale czasu o numerze $j \in T$ można przedstawić jako:

³ W artykule [18], będącym propozycją ujednoczenia terminologii z zakresu modelowania potoków ruchu, wektor transportowy określany jest zarówno jako połączenie dwóch węzłów sieci transportowej, jak i dwóch rejonów transportowych, z których jeden jest miejscem źródłowym potoku ruchu, a drugi miejscem docelowym. Pojęcie to rozszerzono do zbiorów węzłów sieci i zbiorów rejonów transportowych w przypadku bardziej zagregowanego ujęcia zagadnienia.

⁴ Przykładowo analizy warunków ruchu w sieci, związane z oceną stopnia wykorzystania wyposażenia systemu transportowego.

⁵ Przekrój ten najlepiej zlokalizować w środku odcinka.

$$x^p(j) = x^{(a,b)}(j) \cdot \Pr(p, j), \quad j \in T, \quad p \in P^{(a,b)}, \quad (19)$$

gdzie $\Pr(p, j)$ oznacza prawdopodobieństwo wyboru drogi o numerze $p \in P$ (dla określonej relacji $(a, b) \in E$) przy rozpoczynaniu przemieszczania w przedziale czasu $j \in T$.

Natomiast zależność pomiędzy wielkością potoku ruchu $x_{(w,w')}(t)$ przepływającego przez odcinek odwzorowany łukiem $(w, w') \in L$ w przedziale czasu o numerze $t \in T$, a wielkością potoku ruchu $x^p(j)$ na poszczególnych drogach $p \in P$ w sieci miejskiej rozpoczynającego przemieszczanie z miejsca początkowego w przedziale czasu $j \in T$ sformułowano jako:

$$x_{(w,w')}(t) = \sum_{(a,b) \in E} \sum_{p \in P^{(a,b)}} \sum_{j=1}^t \delta_{(w,w')}^p(j, t) \cdot x^p(j) \quad t, j \in T, \quad (w, w') \in L, \quad p \in P. \quad (20)$$

gdzie $\delta_{(w,w')}^p(j, t)$ oznacza udział potoku $x^p(j)$ (wyrażony w zakresie $\langle 0, 1 \rangle$) na drodze o numerze $p \in P$ rozpoczynającego przemieszczanie z miejsca początkowego w przedziale czasu o numerze $j \in T$, który w przedziale czasu o numerze $t \in T$ przepływa przez odcinek odwzorowany łukiem $(w, w') \in L$.

Zadaniem systemu transportowego nie jest sama realizacja przemieszczenia, ale również spełnienie przy tym określonych warunków, które najogólniej można określić jako [20]:

- zapewnienie realizacji przemieszczenia w dokładnie określonym przedziale czasu,
- zapewnienie przyjazdu lub przywozu do dokładnie określonego miejsca docelowego,
- zapewnienie realizacji przemieszczenia dokładnie takim środkiem transportu, który najlepiej odpowiada podatności przewozowej towaru lub charakteryzuje się najmniejszą uciążliwością podróży z punktu widzenia określonego kryterium.

Każde zakłócenie może spowodować naruszenie tych uwarunkowań, a tym samym spadek poziomu jakości przemieszczania. Stąd zasadne wydaje się przyjęcie odpowiedniego poziomu zakłócenia, odpowiadającego określonemu poziomowi strat jakości ruchu, po przekroczeniu którego skutki zakłóceń są odczuwalne przez użytkowników sieci miejskiej. Poziom ten jest ściśle uwarunkowany specyfiką danego obszaru. Akceptacja określonych warunków ruchu i związanej z nimi jakości przemieszczania się ma charakter subiektywny i zależy zarówno od cech użytkownika, okresu doby, typu podróży, jak również funkcji i lokalizacji elementów sieci transportowej.

Dla celów oceny warunków ruchu w sieci miejskiej określono zbiór numerów poziomów zakłóceń, tj.:

$$PZ = \{pz : pz = 1, \dots, \overline{PZ}\}, \quad (21)$$

gdzie \overline{PZ} oznacza liczebność zbioru PZ , czyli liczbę poziomów zakłóceń przyjętych do analizy.

Czas przepływu potoku ruchu przez poszczególne elementy sieci miejskiej jest miarą najbardziej wrażliwą na zmianę warunków ruchu. W związku z tym dla celów modelowania przyjęto, że na zbiorze łuków L zadane jest odwzorowanie, przeprowadzające elementy tego zbioru w zbiór \mathfrak{R}^+ :

$$t0 : L \longrightarrow \mathfrak{R}^+, \quad (22)$$

przy czym $t0_{(w,w')} \in R^+$ ma interpretację wartości średniego czasu przejazdu odcinka odwzorowanego łukiem $(w, w') \in L$ w warunkach ruchu niezakłóconego (swobodnego).

Następnie dla każdego z poziomów zakłóceń $pz \in PZ$ zdefiniowano wartość wydłużenia czasu przemieszczania (oddzielnie dla każdego z odcinków) wynikającą z warunków ruchu określonych dla tego poziomu⁶. Założono więc, że na iloczynie kartezyjskim $PZ \times L$ zbioru numerów poziomów zakłóceń oraz zbioru łuków zadane jest odwzorowanie, przeprowadzające elementy tego iloczynu w zbiór \mathfrak{R}^+ :

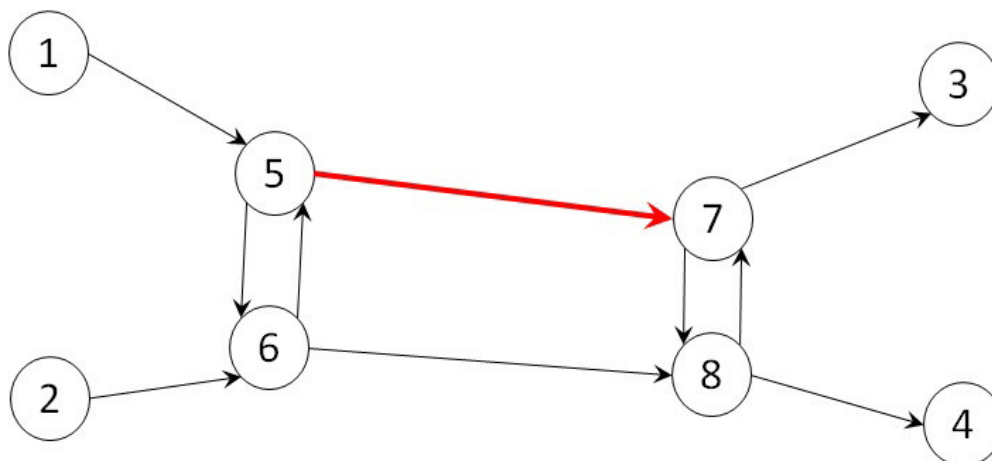
⁶ Przyjęto przy tym założenie, że warunki ruchu opisane określonym poziomem zakłócenia pz są jednakowe na całej długości odcinka odwzorowanego łukiem $(w, w') \in L$.

$$tz : \mathbf{PZ} \times \mathbf{L} \longrightarrow \mathfrak{R}^+, \quad (23)$$

przy czym $tz_{(w,w')}^{pz} \equiv tz(pz, (w, w')) \in \mathfrak{R}^+$ ma interpretację wartości maksymalnego wydłużenia czasu (w odniesieniu do przemieszczania w warunkach ruchu niezakłóconego) na odcinku odwzorowanym łukiem $(w, w') \in \mathbf{L}$ określonej dla poziomu zakłócenia $pz \in \mathbf{PZ}$.

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Jako egzemplifikację przedstawionego podejścia opracowano przykład dla prostej sieci przedstawionej na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat sieci miejskiej

Źródło: opracowanie własne.

Dane opisujące przedstawioną na rysunku 3 sieć drogową:

- zbiór numerów wierzchołków grafu \mathbf{G} , będący odwzorowaniem zbioru wszystkich węzłów sieci miejskiej: $\mathbf{W} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, przy czym: $\mathbf{A} = \{1, 2\}$, $\mathbf{B} = \{3, 4\}$, $\mathbf{V} = \{5, 6, 7, 8\}$,
- zbiór łuków grafu \mathbf{G} , będący odwzorowaniem zbioru odcinków sieci miejskiej:
 $\mathbf{L} = \{(1,5), (5,7), (7,3), (2,6), (6,8), (8,4), (5,6), (6,5), (7,8), (8,7)\}$,
- zbiór relacji podróży: $\mathbf{E} = \{(1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4)\}$
- zbiór numerów wszystkich dróg w sieci miejskiej: $\mathbf{P} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$,

gdzie $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}^{(1,3)}, \mathbf{P}^{(1,4)}, \mathbf{P}^{(2,3)}, \mathbf{P}^{(2,4)}\}$ przy czym:

$\mathbf{P}^{(1,3)} = \{1, 2\}$ gdzie: $\vartheta(1) = \langle (1,5), (5,7), (7,3) \rangle$, $\vartheta(2) = \langle (1,5), (5,6), (6,8), (8,7), (7,3) \rangle$,

$\mathbf{P}^{(1,4)} = \{3, 4\}$ gdzie: $\vartheta(3) = \langle (1,5), (5,7), (7,8), (8,4) \rangle$, $\vartheta(4) = \langle (1,5), (5,6), (6,8), (8,4) \rangle$,

$\mathbf{P}^{(2,3)} = \{5, 6\}$ gdzie: $\vartheta(5) = \langle (2,6), (6,8), (8,7), (7,3) \rangle$, $\vartheta(6) = \langle (2,6), (6,5), (5,7), (7,3) \rangle$,

$\mathbf{P}^{(2,4)} = \{7, 8\}$ gdzie: $\vartheta(7) = \langle (2,6), (6,8), (8,4) \rangle$, $\vartheta(8) = \langle (2,6), (6,5), (5,7), (7,8), (8,4) \rangle$,

- zbiór numerów przedziałów czasu: $\mathbf{T} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, przy czym długość przedziału $\theta = 5$ [min],
- wielkość potoku ruchu $x^{(a,b)}(j)$ w relacji $(a,b) \in \mathbf{E}$ rozpoczynającego przemieszczanie w sieci miejskiej w przedziale czasu o numerze $j \in \mathbf{T}$:

$$[x^{(a,b)}(j)] = \begin{bmatrix} 30 & 50 & 20 & 10 \\ 50 & 60 & 30 & 30 \\ 70 & 70 & 50 & 60 \\ 50 & 50 & 40 & 40 \\ 40 & 60 & 30 & 50 \end{bmatrix}$$

- wartości średniego czasu przejazdu odcinka odwzorowanego łukiem $(w, w') \in L$ (wyrażone w minutach) w warunkach ruchu niezakłóconego (swobodnego):

$$[t0_{(w,w')}] = [4 \ 8 \ 5 \ 5 \ 7 \ 6 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

- zbiór numerów poziomów zakłóceń: $PZ = \{1, 2, 3\}$,
- wartości maksymalnego wydłużenia czasu na odcinku odwzorowanym łukiem $(w, w') \in L$ (wyrażone w minutach) określone dla poziomu zakłócenia $pz \in PZ$:

$$[tz_{(w,w')}^{pz}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 6 & 3 & 3 & 6 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

- wartości prawdopodobieństw $\Pr(p, j)$ wyboru drogi o numerze $p \in P$ (w relacji $(a, b) \in E$) przy rozpoczynaniu przemieszczania w przedziale czasu o numerze $j \in T$:

$$[\Pr(p, j)] = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,3 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 \\ 0,7 & 0,3 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 \\ 0,7 & 0,3 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 \\ 0,7 & 0,3 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 \\ 0,7 & 0,3 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 \end{bmatrix}$$

Zgodnie ze wzorem (19) obliczono wielkości potoków ruchu $x^p(j)$ na drogach o numerach $p \in P$ rozpoczynających przemieszczanie z miejsca początkowego w przedziałach czasu o numerach $j \in T$, tj.:

$$[x^p(j)] = \begin{bmatrix} 21 & 9 & 25 & 25 & 10 & 10 & 7 & 3 \\ 35 & 15 & 30 & 30 & 15 & 15 & 21 & 9 \\ 49 & 21 & 35 & 35 & 25 & 25 & 42 & 18 \\ 35 & 15 & 25 & 25 & 20 & 20 & 28 & 12 \\ 28 & 12 & 30 & 30 & 15 & 15 & 35 & 15 \end{bmatrix}$$

W przykładzie sformułowano równania przepływu potoków ruchu dla wybranego odcinka $(5, 7) \in L$ zgodnie ze wzorem (20) dla następujących czterech przypadków:

- przypadek I – ruch na odcinkach sieci miejskiej nie jest zakłócony (ruch swobodny),

$$x_{(5,7)}(t) = 0,4 \cdot x^1(t-1) + 0,4 \cdot x^3(t-1) + 0,6 \cdot x^1(t-2) + 0,6 \cdot x^3(t-2) + 0,8 \cdot x^6(t-2) + 0,8 \cdot x^8(t-2) + 0,2 \cdot x^6(t-3) + 0,2 \cdot x^8(t-3)$$
- przypadek II – ruch na wszystkich odcinkach sieci miejskiej jest zakłócony na poziomie $pz = 1$,

$$x_{(5,7)}(t) = x^1(t-2) + x^3(t-2) + 0,2 \cdot x^6(t-2) + 0,2 \cdot x^8(t-2) + 0,8 \cdot x^6(t-3) + 0,8 \cdot x^8(t-3)$$
- przypadek III – ruch na wszystkich odcinkach sieci miejskiej jest zakłócony na poziomie $pz = 2$,

$$x_{(5,7)}(t) = 0,6 \cdot x^1(t-2) + 0,6 \cdot x^3(t-2) + 0,4 \cdot x^1(t-3) + 0,4 \cdot x^3(t-3) + 0,6 \cdot x^6(t-3) + 0,6 \cdot x^8(t-3) + 0,4 \cdot x^6(t-4) + 0,4 \cdot x^8(t-4)$$

– przypadek IV – ruch na wszystkich odcinkach sieci miejskiej jest zakłócony na poziomie $pz = 3$.

$$x_{(5,7)}(t) = 0,2 \cdot x^1(t-2) + 0,2 \cdot x^3(t-2) + 0,8 \cdot x^1(t-3) + 0,8 \cdot x^3(t-3) + x^6(t-4) + x^8(t-4)$$

Wyniki dla wszystkich czterech przypadków dla przedziału czasu o numerze $t = 5$ zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Wielkości potoków ruchu przepływających przez wybrany odcinek sieci miejskiej

Przypadek I	Przypadek II	Przypadek III	Przypadek IV
$x_{(5,7)}(5) = 113,6$	$x_{(5,7)}(5) = 111,8$	$x_{(5,7)}(5) = 96$	$x_{(5,7)}(5) = 81,8$

Źródło: opracowanie własne.

Widać więc, że przy odpowiedniej segregacji macierzy podróży oraz przyjęciu odpowiednich założeń co do warunków ruchu w sieci można otrzymywać wartości charakterystyk potoku ruchu na podstawie równań przepływu potoku przez elementy sieci miejskiej. Otrzymane wartości można porównywać z wartościami rzeczywistymi i na tej podstawie budować oraz kalibrować dynamiczny model ruchu. Takie analizy dla sieci o bardziej złożonej topologii wymagają zastosowania specjalistycznych narzędzi informatycznych.

5. PODSUMOWANIE

Głównym celem modelowania w przypadku analizy zakłóceń jest właściwa identyfikacja ich przyczyn oraz ocena poziomu ich oddziaływania. Odpowiedni sposób odwzorowania potoku ruchu w sieci miejskiej pozwala na uwzględnienie szeregu czynników, wpływających na uzyskanie wiarygodnych wyników. Jest to szczególnie istotne w zarządzaniu ruchem, gdzie przekazanie aktualnej, rzetelnej i odpowiednio sformułowanej informacji użytkownikom sieci miejskiej może usprawnić funkcjonowanie całego systemu transportowego miasta.

Każdy użytkownik systemu transportowego realizuje swoją podróż w określonym przedziale czasu. Z punktu widzenia modelowania istotny jest moment rozpoczęcia przemieszczenia oraz moment, kiedy znajdzie się on w określonych miejscach sieci miejskiej. Mogą to być zarówno miejsca charakteryzujące się wyjątkowo uciążliwymi warunkami ruchu, jak i punkty decyzyjne, kiedy użytkownik ma możliwość wyboru sposobu przemieszczania. Trudno jednak uzyskać tak szczegółowe informacje dla każdego użytkownika systemu transportowego, chociaż byłyby one bardzo użyteczne dla precyzyjnego opisu przepływu potoków ruchu w sieci miejskiej. W przedstawionym podejściu analizowany okres został podzielony na elementarne przedziały czasu o jednakowej długości. Umożliwia to odpowiednią segregację macierzy podróży uwzględniającą zmienność popytu w poszczególnych okresach doby. Momenty rozpoczęcia podróży dla określonej liczby podróżnych zostały przyporządkowane do odpowiedniego przedziału czasu, których długość zależy od stopnia dokładności obliczeń uwarunkowanego celem modelowania.

Takie podejście można zastosować nie tylko do identyfikacji zakłóceń w sieci miejskiej (oraz ich poziomu), ale również do budowy i kalibracji dynamicznych modeli ruchu [2, 29, 35], mających zastosowanie w zarządzaniu ruchem. Przedstawione zagadnienie wymaga dalszych badań, szczególnie w zakresie doboru miar, które w sposób kompleksowy analizowałyby poziom oddziaływania zakłóceń na różne elementy systemu transportowego i jego otoczenia. Warto również uwzględnić zróżnicowanie rozkładu potoku na poszczególnych elementach sieci miejskiej oraz zastosować odmienne charakterystyki dla różnych użytkowników i podsystemów transportowych.

Streszczenie

Zakłócenia w sieci miejskiej mogą być potencjalną przyczyną zaburzenia płynności ruchu oraz zmian w procesach decyzyjnych użytkowników systemu transportowego. Właściwa identyfikacja przyczyn zakłóceń oraz ocena ich oddziaływania może przyczynić się do zmniejszenia uciążliwości ruchu. Wymaga to jednak odpowiedniego opisu przepływu potoku ruchu w sieci miejskiej. W publikacji zamieszczono krótki przegląd metod odwzorowania przepływu potoków ruchu. Na tej podstawie sformalizowano model przepływu potoków ruchu dla potrzeb analizy zakłóceń. Dynamiczne odwzorowanie ruchu jest szczególnie istotne przy sporządzaniu prognoz krótkoterminowych wykorzystywanych w systemach zarządzania ruchem.

Słowa kluczowe: sieć miejska, modelowanie ruchu, poziom zakłócenia, teoria potoków ruchu.

Traffic flow modeling in urban network for the analysis of disruptions**Abstract**

Disruptions in the urban network may be a potential cause of disturbances in traffic smoothness and in changes in decision-making processes of transportation system users. Proper identification of the sources of such disruptions and assessment of their impact, can help to reduce the inconvenience in traffic. However, this requires an appropriate description of the traffic flow in the network links. The paper contains a brief overview of methods for description of traffic flows. On this basis, the model of the traffic flows for the analysis of disruptions has been formalized. Dynamic mapping of traffic is particularly important when preparing short-term forecasts used in traffic management systems.

Key words: urban network, traffic modeling, the level of disruption, traffic flow theory.

LITERATURA

- [1] Buslenko N.P., Kałasznikow W.W., Kowalenko I.N., Teoria systemów złożonych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
- [2] Cascetta E., Inaudi D., Marquis G., Dynamic estimation of origin-destination matrices using traffic counts, *Transportation Science* 27, 1993, 363-373.
- [3] Cascetta E., *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*, 2nd Edition. Springer Optimization and Its Application, Vol.29, New York 2009.
- [4] Chamier-Gliszczyński N., Modeling system mobility in urban areas, Carpathian Logistics Congress CLC, Czech Republic, Jeseník 2012.
- [5] Drew D., *Traffic flow theory and control*, Mc Graw – Hill Book Company, New York 1968.
- [6] Florian M., Nguyen S., A combined trip distribution, modal split and trip assignment model, *Transportation Research*, Vol. 12, 1978, pp. 241-246.
- [7] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2008.
- [8] Hagerstrand T., What about people in regional science? *Papers of Regional Science Association*, 24(1): pp.7-21, 1970.
- [9] Haight F., *Mathematical theories of traffic flow*. Academic Press, New York 1963.
- [10] Heidemann D., A queueing theory approach to speed – flow – density relationships, [in:] *Transportation and Traffic Theory*, 1996, 103 – 118, Pergamon.
- [11] Heidemann D., Wegmann H., Queueing at unsignalized intersections, *Transportation Research Part B* 31, 1997, pp. 239-263.
- [12] Henderson J.M., Quandt R.E., *Microeconomic Theory: a Mathematical Approach*, McGraw-Hill, New York 1958.
- [13] Hoogendoorn S.P., Bovy P.H.L., State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 215(1): pp.283-303, 2001.
- [14] Jacyna, M., *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [15] Karoń G., Modelowanie popytu oparte na podróżach pojedynczych, *Logistyka* 2012 nr 4, (dodatek elektroniczny „Logistyka-nauka”) s. 323-342.
- [16] Knight F.H., Some fallacies in the interpretation of social cost. *Quarterly Journal of Economics*, 38: pp.582-606, 1924.

- [17] Krych A., Badania i modelowanie ruchu w aglomeracjach, zarys historyczny, stan i kierunki rozwoju. III Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia komunikacyjnego”. Materiały konferencji, Poznań 2001.
- [18] Krych A., Kaczkowski M., Słownik kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu. II Ogólnopolska Konferencja Naukowo – Techniczna nt. „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP o/Kraków, Nr 94 (153), Kraków 2010, s.357-395.
- [19] Leszczyński, J., Modelowanie systemów i procesów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [20] Letkiewicz A., Gospodarowanie w transporcie samochodowym, Wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2006.
- [21] Maerivoet S., De Moor B., Transportation Planning and Traffic Flow Models, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium 2008.
- [22] Mitchell R.B., Rapkin C., Urban Traffic: A Function of Land Use, Columbia University Press, New York 1954.
- [23] Nagel K., Wagner P., Woessler R., Still flowing: old and new approaches for traffic flow modeling. Operations Research, 51(5): pp.681-710, 2003.
- [24] OECD, Managing urban traffic congestion, European Conference of Ministers of Transport Report, OECD Publishing, Paris 2007.
- [25] Ortuzar J., Willumsen L.G., Modelling transport, 3rd Edition, Wiley, New York 2009.
- [26] Sobota A., Płynność ruchu w świetle badań naukowych, [w:] Systemy transportowe. Teoria i praktyka, VI Konferencja naukowo-techniczna, Katowice, 22 września 2009. Materiały konferencyjne, Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2009, s. 457-464.
- [27] Sobota A., Karoń G., Próba zdefiniowania pojazdu zakłóconego na wybranych odcinkach dróg wielopasowych w aspekcie płynności ruchu, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr kol. 1825, seria Transport z. 66, str. 97-106. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [28] Steenbrink P., Optymalizacja sieci transportowych, WKiŁ, Warszawa 1978.
- [29] Szarata, A., Żygłowicz, J., Dynamiczne modele podróży, [w:] VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań – Rosnówko 15-17 czerwca 2011, SITKRP, oddział w Poznaniu, s.42-51.
- [30] Szymanek A., Sterowanie ruchem w transporcie – koncepcja podstaw teoretycznych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, z.35, Warszawa 1996.
- [31] Wardrop J.G., Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, 1952, pp. 352-362.
- [32] Wicher J., Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego, WKiŁ, seria „Pojazdy samochodowe”, Warszawa 2004.
- [33] Woch J., Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych, Polska Akademia Nauk – oddział w Katowicach, Komisja Transportu. Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.
- [34] Żak J., Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz, Prace Naukowe, s. Transport, z.99, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [35] Żochowska R., Dynamic Approach to the Origin-Destination Matrix Estimation in Dense Street Networks, The Archives of Transport, Vol.24/2012, Issue 3, pp.389-413.
- [36] Żochowska R., Model struktury sieci miejskiej dla potrzeb oceny wariantów organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa drogowego, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, z.97, s.555-564, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [37] Żochowska R., Modelowanie wyboru drogi w transporcie indywidualnym – wybrane aspekty, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport z.86, s.83-104, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [38] Żochowska R., Modelowanie zachowań podróżnych w warunkach zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich, VI konferencja „Systemy Logistyczne – teoria i praktyka” w Korytnicy, 11-14 września 2012, Logistyka 4/2012 (dodatek elektroniczny „Logistyka-nauka”) s.803-818.
- [39] Żochowska R., Karoń G., Przegląd literatury na temat zjawiska kongestii i zakłóceń ruchu w systemie transportowym miasta w aspekcie modelowania podróży, III Ogólnopolska Konferencja Naukowo – Techniczna nt. „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”, Kraków 15-16 listopada 2012, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP o/Kraków, Nr 98, Kraków 2012, s.251-276.
- [40] Żochowska R., Karoń G., Sobota A., Podatność na zakłócenia jako miara efektywności sieci drogowej w mieście, [w:] Krych A., Rychlewski J. (red.): Wydajność systemów transportowych, Materiały konferencyjne IX Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań – Rosnówko 19-21 czerwca 2013, SITKRP, oddział w Poznaniu, s. 401-420.