

ŻOCHOWSKA Renata<sup>1</sup>  
KARON Grzegorz<sup>2</sup>  
SOBOTA Aleksander<sup>3</sup>

## Zarządzanie kongestią w sieciach miejskich – wybrane aspekty

### WSTĘP

Coraz większy rozwój miast pod względem gospodarczym, kulturowym i społecznym powoduje wzrost ich atrakcyjności dla podmiotów, które dążą do lokalizacji swoich siedzib w rejonach centralnych, wywołując tym samym naturalne potrzeby przemieszczania mieszkańców i innych użytkowników systemu transportowego. Jednak sieć drogowa w obszarach miejskich charakteryzuje się ograniczoną pojemnością i często nie jest w stanie przejąć narastającego natężenia ruchu pojazdów powstającego zarówno w okresach szczytu komunikacyjnego, jak i w przypadku wystąpienia różnego typu zdarzeń nieplanowanych (np. awarie pojazdów, kolizje i wypadki drogowe). Takie sytuacje przyczyniają się z kolei do zatłoczenia elementów infrastruktury transportowej, w wyniku czego dochodzi do znacznych kolejek, zatorów komunikacyjnych, a nawet zablokowania części obszaru dla ruchu [22]. Wywołuje to spadek poziomu bezpieczeństwa, sprawności i efektywności podróżowania. Zjawiska te oddziałują również negatywnie na środowisko i zdrowie mieszkańców, w związku z czym pogarsza się jakość funkcjonowania całej jednostki osadniczej jako systemu.

Obecnie obserwuje się charakterystyczne trendy związane z występowaniem zatłoczenia w sieciach miejskich [3]. Jednym z nich jest coraz większy wpływ kongestii na funkcjonowanie całego systemu miasta. Problemy związane z nadmiernym obciążeniem ruchem są zauważalne i odczuwalne nie tylko na większości dróg o dużym znaczeniu komunikacyjnym. W obszarach zurbanizowanych kongestia w coraz większym stopniu rozprzestrzenia się na otoczenie, prowadząc do tego, że drogi osiedlowe wykorzystywane są jako drogi objazdowe zatłoczonych ciągów komunikacyjnych. W związku z tym jednostki zarządzające ruchem w mieście (często na wniosek mieszkańców) opracowują rozwiązania, których celem jest wprowadzenie ograniczeń lub utrudnień ruchu w mieście, stosując różnego rodzaju strategie i techniki innowacyjne (np. strefowanie, metody uspokojenia ruchu). Ponadto problem zatłoczonych elementów infrastruktury drogowej nie jest już rozpatrywany jedynie z perspektywy godziny szczytu. Obciążenie ruchem często wydłuża się do kilku godzin w okresach porannych i popołudniowych. Istnieje również wiele miejsc w miastach, gdzie ruch spowolniony zatłoczeniem trwa przez większą część dnia. Również problemem zaczyna być ruch w okresie weekendowym, szczególnie w obszarach rekreacyjnych, blisko centrów handlowych i obiektów sportowych [3].

W obszarach miejskich zauważa się również proces wydłużania czasu podróży. Obecnie nie tylko podróże dojazdowe do pracy są narażone na zakłócenia, ale również podróże o charakterze fakultatywnym. W związku z tym osoby podróżujące rozważają inne możliwości realizacji celu przemieszczania. Dodatkowo, w sytuacji permanentnego wzrostu obciążenia ruchem, ze względu na fizyczne wyczerpanie przepustowości sieci drogowej, system staje się bardziej podatny na zakłócenia nietypowe spowodowane przez zdarzenia nieplanowane typu wypadki i kolizje drogowe, niekorzystne warunki atmosferyczne lub roboty drogowe [24]. Zdarzenia te mogą pojawić się w dowolnym czasie i w miejscach, gdzie wcześniej nie występowała kongestia i tym samym powodują rozprzestrzenianie się zakłóceń w czasie i przestrzeni (tzw. kongestią wtórną) [22].

Spadek jakości funkcjonowania systemu transportowego miasta spowodowany kongestią jest akceptowalny przez jego użytkowników dopóki zyski z przemieszczania się rekompensują

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Systemów Transportowych i Inżynierii Ruchu, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8. Tel: +48 32 603 41 21, +48 32 603 43 32, Fax: +48 32 603 43 29, Renata.Zochowska@polsl.pl

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Systemów Transportowych i Inżynierii Ruchu, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8. Tel: +48 32 603 41 59, +48 32 603 43 32, Fax: +48 32 603 43 29, Grzegorz.Karon@polsl.pl

<sup>3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Systemów Transportowych i Inżynierii Ruchu, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8. Tel: +48 32 603 41 21, +48 32 603 43 32, Fax: +48 32 603 43 29, Aleksander.Sobota@polsl.pl

występujące uciążliwości. W pewnym jednak momencie należy podjąć odpowiednie działania, prowadzące do zwiększenia atrakcyjności systemu transportowego miasta. W tym celu wykorzystuje się różnorodne narzędzia zarządzania kongestią.

## 1 PROBLEMATYKA ZARZĄDZANIA KONGESTIĄ W MIASTACH

Pojęcie kongestii może być rozumiane na wiele sposobów. Ogólnie **kongestie transportowa** definiuje się jako wzajemne utrudnianie ruchu przez pojazdy, wynikające z obiektywnej zależności między prędkością przemieszczania się a wielkością przepływu [7, 25], w sytuacji, gdy stopień wykorzystania pojemności systemu transportowego osiąga wartości bliskie wartościom granicznym [6]. Kongestia rozpatrywana jest w kontekście wzajemnego oddziaływania użytkowników systemu transportowego powodującego negatywne skutki eksploatacyjne i ekonomiczne. W tym aspekcie oznacza ona różnicę, wyrażoną w kosztach zasobów, między siecią drogową, funkcjonującą w warunkach rzeczywistych a siecią eksploatowaną w warunkach idealnych, w których nie występują straty czasu a ruch odbywa się z maksymalnie bezpieczną prędkością [13].

Na konferencji krajów OECD [12], podsumowując dotychczasowe doświadczenia w zakresie oceny zakłóceń występujących w ruchu drogowym, stwierdzono, że **nie istnieje uniwersalna definicja kongestii**. Powinna być więc ona traktowana przede wszystkim jako zjawisko względne, które związane jest z różnicą pomiędzy oczekiwaną przez użytkowników wydajnością układu drogowego, a sposobem, w jaki układ ten funkcjonuje [12]. W takim ujęciu można rozpatrywać kongestię w kontekście luki jakościowej pomiędzy jakością oczekiwaną a realizowaną. Oczekiwania użytkowników dotyczące wydajności systemu drogowego mają więc kluczowe znaczenie dla zrozumienia sposobu postrzegania kongestii. Te same poziomy ruchu mogą być postrzegane zarówno jako bardzo uciążliwe (nieakceptowalne), jak i zadowalające w zależności od cech użytkowników drogi, takich jak: wiek, doświadczenie w prowadzeniu pojazdu, temperament i inne. Dalsze czynniki mogą zależeć od celu podróży oraz znajomości sieci przez podróżnych [23].

Oczekiwania użytkowników w odniesieniu do warunków podróży nie są statyczne i charakteryzują się znacznym poziomem heterogeniczności, co wpływa na sposób postrzegania kongestii [12]. W określonych warunkach ruchu pewien poziom zakłócenia jest możliwy do zaakceptowania. Świadczą o tym m.in. wyniki badań przedstawione w publikacji [15], które wskazują, że znaczna część użytkowników transportu indywidualnego w Aglomeracji Górnośląskiej postrzega **ruch płynny** jako w ogóle możliwość przemieszczania się w sieci objętej kongestią. Można zaryzykować stwierdzenie, że kierowcy ci przyzwyczaili się już do poruszania się w sieciach zatłoczonych, co powoduje obniżenie wymaganego poziomu jakości ruchu<sup>4</sup>. W związku z tym Autorzy rozróżniają dwa typy ruchu płynnego: **swobodny**, charakteryzujący się możliwością wyboru prędkości niezależnym od innych użytkowników ruchu, oraz **wymuszony**, w którym pojazdy przemieszczają się ze stałą prędkością, jednak jest ona ściśle zdeterminowana aktualnymi warunkami ruchu [15]. Należy również podkreślić, że głównym czynnikiem przy analizie wpływu kongestii na zachowania podróżnych, oprócz strat czasu wynikających z wydłużenia czasu przemieszczania, jest niezawodność lokalizacji kolejki, czasu jej trwania i momentu rozpoczęcia [6].

W zależności od przyczyn i sposobu powstawania wyróżnia się **kongestię cykliczną** (strukturalną) (ang. *recurring congestion, recurrent congestion*) oraz **kongestię przypadkową** (incydentalną) (*random congestion, non-recurring congestion*) [8, 22]. Kongestia cykliczna wynika z nadmiernego zapotrzebowania na transport, pojawiającego się w szczytach poszczególnych cykli (godzinowych, dobowych, tygodniowych, sezonowych, rocznych) w stosunku do ograniczonej przepustowości i jest charakterystyczna dla elementów sieci transportowej, stanowiących tzw. „wąskie gardła” systemu transportowego, które cechują się dużą podatnością na zakłócenia. Natomiast kongestia przypadkowa jest efektem szczególnych chwilowych warunków lub okoliczności (np. zdarzenia losowe, roboty inżynierskie, imprezy masowe, chwilowy zły stan nawierzchni, niekorzystne warunki atmosferyczne, itp.). Należy również zwrócić uwagę na to, że często trudno jednoznacznie wskazać konkretną

<sup>4</sup> W publikacjach amerykańskich do opisu tej sytuacji stosuje się pojęcie „akceptowalnej kongestii” (ang. *acceptable congestion*) [1]. Na tej podstawie można więc rozróżnić **kongestię akceptowalną i nieakceptowalną**.

przyczynę zakłóceń, a kongestia może wynikać z wielu różnorodnych czynników. Stopień oddziaływania pomiędzy nimi może być zróżnicowany zarówno w czasie (w poszczególnych okresach doby i dniach), jak i w przestrzeni (na poszczególnych elementach sieci). Jedne czynniki powodują powstawanie kolejnych [22].

Warto ponadto zauważyć, że specyficzne mechanizmy związane z powstawaniem kongestii różnią się w zależności od klasy drogi. Kongestia na obiektach umożliwiających nieprzerwany potok ruchu (np. autostrady, drogi ekspresowe) nie pojawia się w ten sam sposób i z tych samych przyczyn, co kongestia na obiektach charakteryzujących się przerywanym potokiem ruchu [12]. Ruch w gęstych sieciach miejskich, w przeciwieństwie do ruchu zamiejskiego, w dłuższych horyzontach czasu **nie może być więc traktowany jako swobodny ruch płynny**. Jedynie w krótkich przedziałach czasu w przypadku przemieszczania się pomiędzy węzłami sieci można mówić o chwilowej płynności ruchu [14, 21].

Potoki ruchu na poszczególnych elementach sieci miejskiej są wynikiem realizacji **procesu transportowego**<sup>5</sup> realizowanego w systemie transportowym miasta i jego otoczeniu. Proces ten w najogólniejszy sposób można określić jako „zbiór wyspecjalizowanych czynności, wzajemnie ze sobą powiązanych i występujących w określonej kolejności czasowej, którego zadaniem jest przemieszczanie osób z punktu początku podróży do jej końca i/lub ładunków z miejsc produkcji do miejsc konsumpcji” [4]. Tak zdefiniowany proces transportowy jest wynikiem **podprocesów decyzyjnych** użytkowników systemu transportowego zachodzących w różnych horyzontach czasowych. Wśród nich można wyodrębnić podprocesy [11]:

- krótkoterminowe – związane z bieżącymi decyzjami kierowców przy przemieszczaniu się poszczególnymi elementami sieci drogowej (np. wybór pasa na wlocie skrzyżowania),
- średnioterminowe – związane z wyborem drogi przemieszczania w sieci i poszukiwaniem wolnych miejsc parkingowych,
- długoterminowe – związane z decyzjami użytkowników sieci o przemieszczaniu i wyborze środka transportu.

Z wymienionymi podprocesami kojarzy się odpowiednie sposoby oddziaływania w formie zarządzania<sup>6</sup>. W inżynierii ruchu można wyróżnić zarządzanie operacyjne, taktyczne i strategiczne [5]. Zadania poszczególnych typów zarządzania przedstawiono w tabeli 1, a wzajemne powiązania pomiędzy poszczególnymi podprocesami i typami zarządzania zaprezentowano w formie struktury hierarchicznej na rysunku 1. **W sytuacji występowania zakłóceń konieczne jest podjęcie odpowiednich działań na każdym z przedstawionych etapów zarządzania.**

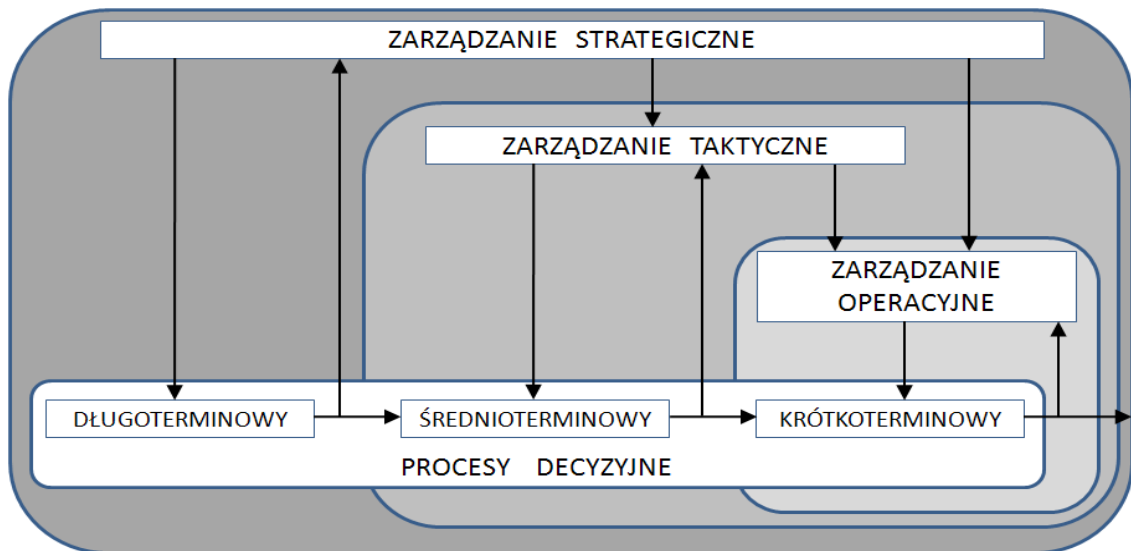
Tab.1. Powiązania podprocesów ruchu w mieście z typem zarządzania (na podstawie [5]).

Podproces	Typ zarządzania	Zadanie zarządzania
krótkoterminowy	operacyjne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabilizacja ruchu (m.in. za pomocą sygnalizacji świetlnej),</li> <li>• dynamiczny przydział pasów ruchu do kierunku lub środka transportu (m.in. za pomocą znaków zmiennej treści)</li> </ul>
średnioterminowy	taktyczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bezpośrednie oddziaływanie na podproces decyzyjny wyboru drogi w sieci w formie informacji (m.in. za pomocą tablic zmiennej treści i nawigacji wewnątrz pojazdów, informacja na przystanku),</li> <li>• dywersyfikacja ruchu w celu ograniczenia powstawania wtórnego zatłoczenia (równoważenie obciążenia tras alternatywnych poprzez odpowiednie sterowanie ruchem)</li> </ul>

<sup>5</sup> Proces transportowy, stanowiący część procesu przemieszczania, wywołuje zmianę położenia osób i/lub ładunków w przestrzeni [10]. **Proces przemieszczania** oprócz procesu transportowego może obejmować także czynności przygotowawcze towarzyszące transportowi, w których uczestniczy wyłącznie użytkownik [10]. Do takich czynności w przypadku transportu indywidualnego można zaliczyć przejście piesze z miejsca początkowego podróży do miejsca parkowania pojazdu oraz przejście piesze z miejsca parkowania pojazdu do miejsca docelowego podróży; w przypadku korzystania z usług transportu zbiorowego – przejście piesze z miejsca początkowego podróży na przystanek transportu zbiorowego oraz czas oczekiwania na przystanku; w przypadku transportu towarowego – przygotowanie ładunku do przewozu.

<sup>6</sup> W literaturze przedmiotu występuje pewien chaos terminologiczny dotyczący definicji „zarządzania”, „sterowania”, „kierowania”, „planowania”, „organizacji” oraz „regulacji” w odniesieniu do procesów ruchowych [19]. Według Bojarskiego [2] „zarządzanie” jest pojęciem dość szerokim obejmującym zarówno „kierowanie” (oddziaływanie na ludzi), jak i „sterowanie” (oddziaływanie na urządzenia lub procesy).

Podproces	Typ zarządzania	Zadanie zarządzania
długoterminowy	strategiczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bezpośrednie oddziaływanie na podproces decyzyjny dotyczący przemieszczania i wyboru środka transportu (m.in. za pomocą informacji przekazywanej przez media),</li> <li>• pośrednie oddziaływanie (poprzez poziom taktyczny) na określenie odpowiednich kryteriów i ograniczeń dla optymalizacji koordynacji ruchu (np. preferując środki transportu publicznego),</li> <li>• pośrednie oddziaływanie (poprzez poziom operacyjny) na parametry sygnałów sterujących w celu osiągnięcia określonego priorytetu.</li> </ul>



Rys.1. Hierarchiczna struktura zarządzania ruchem z punktu widzenia oddziaływania na procesy decyzyjne (na podstawie [5]).

Tradycyjne modele stosowane przez administrację drogową koncentrowały się głównie na zarządzaniu systemami drogowymi w obszarach miejskich w taki sposób, aby maksymalizować ich zdolność do przejścia obecnego i przyszłego oczekiwanego popytu. W takim podejściu dąży się do maksymalizacji fizycznego wykorzystania dostępnej przepustowości drogi, biorąc pod uwagę inne cele zarządzania, jak np. bezpieczeństwo ruchu. Układ drogowy oceniany jest pod względem zdolności przepustowej wyrażanej w postaci wielkości potoku, gęstości lub syntetycznie – poziomu swobody ruchu. Uzyskiwanie korzystniejszych wartości tych parametrów w aspekcie przepustowości obiektu traktowane było jako poprawa warunków ruchu [12]. Takie operacyjne podejście jest stosowane przy identyfikacji lokalizacji „wąskich gardeł” systemu. Ich celem jest minimalizacja strat czasu i negatywnego oddziaływania w miejscu, które charakteryzuje się szczególną uciążliwością dla użytkowników. **Jednak metody, których celem jest maksymalizacja przepływu wzdłuż głównych odcinków mogą powodować przeniesienie zakłóceń do mniej stabilnych rejonów i zwiększają ryzyko powstania cyklicznych i nieprzewidywalnych problemów komunikacyjnych.**

Ekonomiczne techniki szacowania kongestii i jej wpływu doprowadziły do alternatywnych podejść, w których określa się „optymalny” poziom ruchu dla danej drogi, skrzyżowania, sieci, itp. Koszty kongestii określane są jako koszty poniesione w przypadku, gdy poziom ruchu przekroczył poziom „optymalny”. Szczegółowo, koszty te można interpretować jako koszty nałożone przez każdego dodatkowego użytkownika drogi na innych użytkowników sieci oraz na społeczeństwo jako całość. W **podjęciu optymalnym** rozważa się zarówno popyt na przestrzeń drogową, jak i podaż i szuka się równowagi pomiędzy nimi. Optymalny poziom kongestii w aspekcie ekonomicznym uwzględnia nie tylko koszt przemieszczania danym elementem sieci drogowej, ale również wielkość kosztów, jaką użytkownicy są w stanie ponieść, aby korzystać z drogi. Ekonomicznie „optymalny” poziom ruchu nie tylko powinien pociągać za sobą odpowiedni poziom zakłóceń, ale również

powinien mieć charakter zmienny, co oznacza, że powinien zależeć nie tylko od przepustowości określonego elementu infrastruktury [12].

## 2 STRATEGIE ZARZĄDZANIA KONGESTIĄ W MIASTACH

Efektywne zarządzanie kongestią obejmuje nie tylko zmiany w systemie transportowym i jego otoczeniu, ale również w odpowiedni sposób oddziałuje na decyzje jego użytkowników w zakresie sposobu i czasu realizacji podróży. Duże zróżnicowanie struktury użytkowników systemu transportowego i motywacji ich przemieszczeń wymaga zastosowania różnorodnych narzędzi zarządzania kongestią.

W obszarach miejskich o zwartej zabudowie możliwości inwestowania w dodatkową infrastrukturę transportową są mocno ograniczone. W korytarzach transportowych zlokalizowanych na terenach zurbanizowanych coraz częściej brakuje fizycznej przestrzeni do budowy kolejnych pasów ruchu. W związku z tym skuteczne rozwiązanie problemów komunikacyjnych wiąże się z wykorzystaniem różnych dostępnych strategii. Ogólnie można wyróżnić trzy zasadnicze podejścia do zarządzania kongestią [3]:

- zwiększenie zdolności przepustowej – obejmujące budowę dodatkowych dróg, zwiększenie liczby pasów oraz poszerzenie oferty w zakresie publicznego transportu zbiorowego i przewozu towarów,
- działania operacyjne – obejmujące rozwiązania techniczne i organizacyjne zwiększające istniejącą zdolność przepustową bez inwestowania w rozbudowę infrastruktury transportowej,
- zarządzanie popytem – obejmujące działania wpływające na kształtowanie potrzeb transportowych w taki sposób, aby zmniejszyć stopień wykorzystania istniejącej zdolności przepustowej.

Przykładowe rozwiązania wykorzystywane w zakresie tych podstawowych trzech strategii przedstawiono w tabelicy 2.

Tab.2. Narzędzia zarządzania kongestią w miastach (na podstawie [3]).

STRATEGIA ZARZĄDZANIA	OBSZAR DZIAŁANIA	PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ
zwiększenie zdolności przepustowej	infrastruktura drogowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– nowe autostrady i drogi ekspresowe,</li> <li>– dodatkowe pasy ruchu,</li> <li>– zapewnienie spójnej sieci ulic,</li> <li>– nowe drogi płatne,</li> <li>– dodatkowe pasy płatne,</li> <li>– wielopoziomowe bezkolizyjne węzły drogowe,</li> <li>– pasy dla pojazdów z większą liczbą pasażerów (ang. <i>HOV lanes</i>),</li> <li>– wielomodalne korytarze transportowe.</li> </ul>
	publiczny transport zbiorowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>– nowe linie kolejowe,</li> <li>– nowe trasy i linie autobusowe,</li> <li>– nowe wydzielone pasy dla autobusów (ang. <i>BRT – bus rapid transit</i>),</li> <li>– dodatkowe linie na istniejących trasach,</li> <li>– dodatkowe kursy dla istniejących linii,</li> <li>– trasy obiegowe obejmujące obsługę głównych generatorów ruchu (ang. <i>circulator routes</i>),</li> <li>– parkingi dla systemów „Park and Ride”.</li> </ul>
	transport towarowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>– pasy wyłącznie dla pojazdów ciężarowych,</li> <li>– usprawnienia w zakresie transportu kolejowego.</li> </ul>
działania operacyjne	drogi główne w miastach	<ul style="list-style-type: none"> <li>– systemy informujące o warunkach atmosferycznych (ang. <i>road weather information systems</i>),</li> <li>– ulepszenia w zakresie parametrów geometrycznych,</li> <li>– kanalizacja ruchu na skrzyżowaniach,</li> <li>– zmiany organizacji ruchu w obszarze skrzyżowania,</li> <li>– ulice jednokierunkowe,</li> <li>– zarządzanie dostępnością do infrastruktury drogowej,</li> <li>– zaawansowane systemy sygnalizacji świetlnej,</li> <li>– koordynacja sygnalizacji świetlnej,</li> <li>– pasy o zmiennych kierunkach ruchu (ang. <i>changeable lanes</i>),</li> <li>– wydzielone pasy dla pojazdów z większą liczbą pasażerów (ang. <i>HOV ramp bypass</i>),</li> </ul>

STRATEGIA ZARZĄDZANIA	OBSZAR DZIAŁANIA	PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ
		<ul style="list-style-type: none"> <li>– systemy zarządzania w przypadku zdarzeń drogowych (ang. <i>incident management systems</i>),</li> <li>– systemy zarządzania w przypadku imprez masowych (ang. <i>event management systems</i>),</li> <li>– systemy zapewniające informację w czasie rzeczywistym (ang. <i>real-time traveler information system</i>),</li> <li>– ograniczenia parkowania.</li> </ul>
	autostrady	<ul style="list-style-type: none"> <li>– centra zarządzania ruchem (ang. <i>Transportation Management Center Operations</i>),</li> <li>– systemy zarządzania w przypadku zdarzeń drogowych (ang. <i>incident management systems</i>),</li> <li>– systemy zarządzania w przypadku imprez masowych (ang. <i>event management systems</i>),</li> <li>– systemy regulujące ruch wjazdowy na autostradę (ang. <i>ramp metering systems</i>),</li> <li>– systemy sygnalizacji świetlnej umożliwiające różne wykorzystanie pasów ruchu (ang. <i>lane controls</i>),</li> <li>– systemy zarządzania ruchem na pasach (ang. <i>managed lanes</i>),</li> <li>– systemy zapewniające informację w czasie rzeczywistym (ang. <i>real-time traveler information system</i>),</li> <li>– elektroniczne systemy poboru opłat (ang. <i>electronic toll collection</i>),</li> <li>– systemy zarządzania robotami drogowymi (ang. <i>work zone management systems</i>),</li> <li>– systemy informujące o warunkach atmosferycznych (ang. <i>road weather information systems</i>),</li> <li>– zróżnicowane ograniczenia prędkości (ang. <i>variable speed limits</i>),</li> <li>– czasowe zamknięcia wjazdów na autostradę.</li> </ul>
	publiczny transport zbiorowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>– systemy lokalizacji pojazdów transport zbiorowego (ang. <i>AVL – automatic vehicle location</i>),</li> <li>– zaawansowane rozkłady jazdy,</li> <li>– priorytety sygnalizacji świetlnej dla autobusów,</li> <li>– wydzielone pasy dla autobusów,</li> <li>– systemy zapewniające informację o przyjazdach i odjazdach pojazdów transportu zbiorowego w czasie rzeczywistym (ang. <i>real-time transit information system</i>),</li> <li>– linie ekspresowe,</li> <li>– systemy usług publicznego transportu zbiorowego dostosowywane do potrzeb przewozowych (ang. <i>DRT – demand responsive transit</i>),</li> <li>– systemy taryfowe.</li> </ul>
	transport towarowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>– systemy lokalizacji pojazdów,</li> <li>– systemy zapewniające informację w czasie rzeczywistym (ang. <i>real-time freight information system</i>),</li> <li>– systemy elektronicznego skanowania pojazdów.</li> </ul>
zarządzanie popytem	inne możliwości realizacji podróży	<ul style="list-style-type: none"> <li>– inny okres realizacji podróży,</li> <li>– inne godziny pracy,</li> <li>– telepraca,</li> <li>– zmiana środka transportu (np. rower, transport zbiorowy),</li> <li>– zachęcanie do przemieszczeń pieszych,</li> <li>– inne koszty podróży,</li> <li>– edukacyjne kampanie publiczne na temat podróżowania.</li> </ul>
	zagospodarowanie przestrzenne	<ul style="list-style-type: none"> <li>– polityka “inteligentnego rozwoju” miasta,</li> <li>– spójna infrastruktura dla ruchu pieszego i rowerowego,</li> <li>– projektowanie stacji i przystanków publicznego transportu zbiorowego,</li> <li>– projektowanie zorientowane na transport zbiorowy,</li> <li>– strategie parkowania.</li> </ul>
	systemy opłat	<ul style="list-style-type: none"> <li>– opłaty za korzystanie z pasów ruchu przeznaczonych dla pojazdów z większą liczbą pasażerów (ang. <i>HOT – high occupancy toll</i>),</li> <li>– opłaty w określonych przedziałach czasowych,</li> <li>– opłaty parkingowe.</li> </ul>
	podróżowanie z	<ul style="list-style-type: none"> <li>– systemy poszukiwania i dopasowywania współpasażerów,</li> </ul>

STRATEGIA ZARZĄDZANIA	OBSZAR DZIAŁANIA	PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ
	większą liczbą pasażerów (ang. <i>HOV lanes</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>– organizacje zajmujące się obsługą transportową i kształtowaniem mobilności (ang. <i>Transportation Management Associations</i>),</li> <li>– vanpooling – wspólne przejazdy z wykorzystaniem pojazdów o większej pojemności,</li> <li>– udogodnienia na parkingach dla pojazdów z większą liczbą pasażerów,</li> <li>– zwroty opłaty za parkowanie,</li> <li>– gwarantowanie bezpłatnego dojazdu do domu w nagłych przypadkach (ang. <i>GRH – Guaranteed Ride Home</i>),</li> <li>– systemy zapewniające szybką obsługę (ang. <i>real-time ridesharing, instant ridesharing, dynamic ridesharing, ad-hoc ridesharing, on-demand ridesharing, dynamic carpooling</i>).</li> </ul>
	publiczny transport zbiorowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>– dotacje do przejazdów transportem zbiorowym,</li> <li>– projektowanie zorientowane na transport zbiorowy,</li> <li>– atrakcyjne zagospodarowanie infrastruktury na stacjach i przystankach transportu zbiorowego,</li> <li>– możliwości planowania trasy podróży,</li> <li>– organizacje zajmujące się obsługą transportową i kształtowaniem mobilności (ang. <i>Transportation Management Associations</i>),</li> <li>– systemy bezpieczeństwa w pojazdach i na przystankach transportu zbiorowego.</li> </ul>
	transport towarowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>– płatne pasy wyłącznie dla pojazdów ciężarowych (ang. <i>TOT – truck only toll lanes</i>),</li> <li>– ograniczenia na pasach ruchu,</li> <li>– ograniczenia dostaw dla pojazdów ciężarowych.</li> </ul>

W raporcie [12] wyróżniono trzy główne zasady efektywnego zarządzania kongestią:

- zasada 1 – koordynacja pomiędzy zagospodarowaniem przestrzennym a planowaniem transportu,
- zasada 2 – zapewnienie systemu transportowego o wysokim poziomie niezawodności,
- zasada 3 – efektywne zarządzanie popytem.

Doświadczenia wielu krajów wskazują na to, że dobrze przemyślana polityka zagospodarowania przestrzennego, która uwzględni oczekiwania społeczne dotyczące długoterminowego rozwoju miasta i systemu transportowego, może mieć pozytywny wpływ na obciążenie ruchem poszczególnych elementów infrastruktury drogowej. Z drugiej jednak strony, mogą to być krótkotrwałe rezultaty ze względu na stały rozwój miasta i bez wypracowania innych strategii w zakresie zarządzania ruchem może dojść do powstania problemów komunikacyjnych.

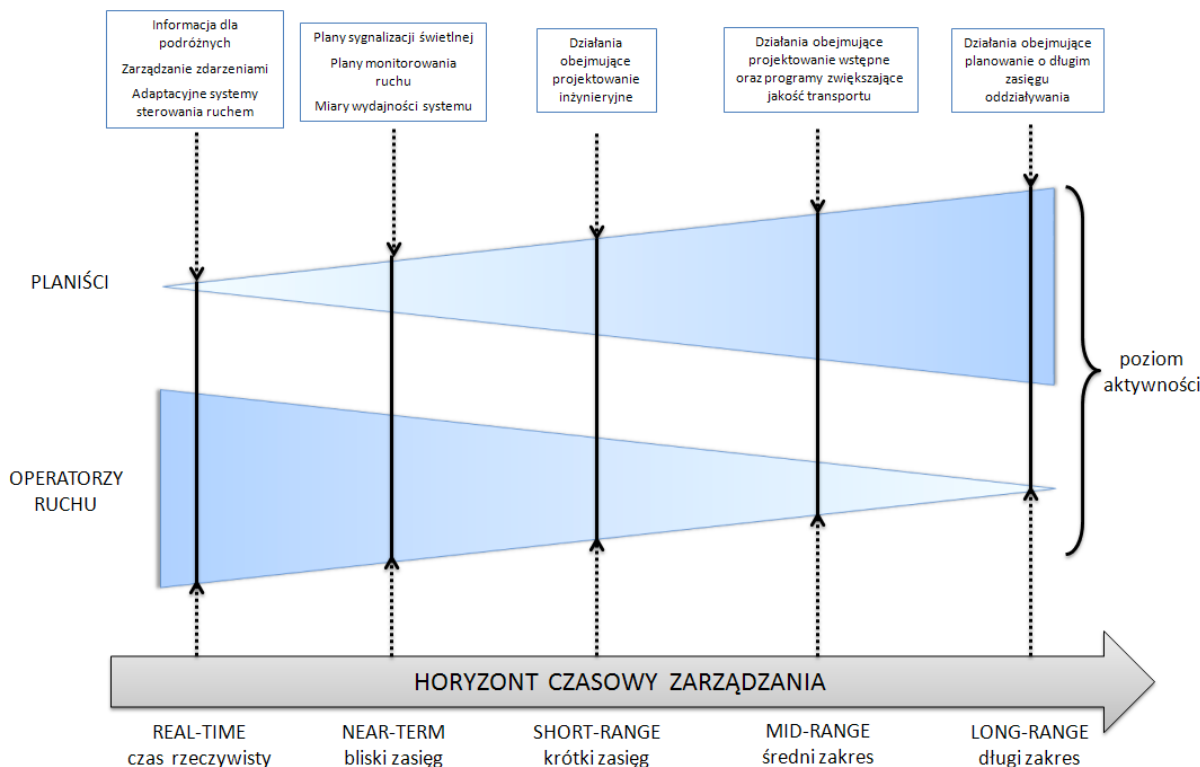
Większość badań wskazuje, że wzrost kongestii nie tylko powoduje spadek prędkości i wzrost średniego czasu podróży, ale również jego zmienności [9]. W związku z tym rośnie trudność z oszacowaniem wielkości czasu pozwalającej osiągnąć miejsce docelowe w określonym momencie. Problem ten jest szczególnie istotny w podróżach o charakterze obligatoryjnym oraz w sytuacjach, gdzie punktualność jest istotna (np. ważne spotkania, zmiana środka transportu przy krótkich czasach oczekiwania na przesiadkę). Dlatego zapewnienie odpowiedniego poziomu niezawodności czasu przemieszczania w sieci transportowej staje się jednym z głównych celów zarządzania kongestią.

Istnieje ścisła dodatnia zależność pomiędzy zwiększeniem dodatkowej zdolności przepustowej elementów infrastruktury drogowej a zwiększeniem popytu transportowego [16, 17]. W związku z tym jedynym sposobem uzyskania efektywnych rezultatów w zakresie zarządzania kongestią jest wykorzystanie również środków kształtujących zachowania transportowe mieszkańców miast.

### 3 ZINTEGROWANE PODEJŚCIE DO ZARZĄDZANIA KONGESTIĄ

Zarządzanie kongestią w sposób zintegrowany wymaga zaangażowania zarówno na poziomie planowania, jak i na poziomie operacyjnym. **Planowanie transportu** ma na celu identyfikację braków w funkcjonowaniu systemu transportowego w krótkim i długim horyzoncie czasu oraz poszukiwanie rozwiązań, które mogłyby zmniejszyć ich uciążliwość. Podejmowanie decyzji na szczeblu regionalnym wymaga koordynacji wielu działań dotyczących różnych obszarów i zakresów. Z kolei **działania operacyjne** wymagają współpracy i koordynacji pomiędzy agencjami działającymi

na terenie danego regionu oraz pomiędzy transportem i innymi gałęziami, np. służbami bezpieczeństwa publicznego [3]. Na rysunku 2 przedstawiono powiązania pomiędzy tymi dwoma typami zarządzania dla zapewnienia większej efektywności działań. Główny nacisk położono na to, że chociaż każda z grup (planiści i organizatorzy ruchu) ma swoje własne priorytety, to jednak zarówno planiści, jak i organizatorzy powinni uczestniczyć w działaniach na różnych poziomach, przy czym zakres ich czynności jest zależny od horyzontu czasowego.



Rys.2. Udział w zadaniach dla planistów i organizatorów ruchu (na podstawie [3]).

Przykładami wzajemnej współpracy pomiędzy jednostkami zajmującymi się planowaniem i organizowaniem ruchu może być m.in. [3]):

- poprawa czasu reakcji i podejmowania decyzji podczas zdarzeń drogowych i w sytuacjach zagrożenia (kryzysowych) przez skuteczną koordynację działań i wzajemną współpracę operatorów systemu transportowego i urzędników zajmujących się bezpieczeństwem publicznym,
- skuteczna współpraca pomiędzy organizatorami przewozów publicznych i organów zarządzających ruchem w czasie prowadzenia robót drogowych,
- koordynacja działań transportowych i zarządzanie popytem pomiędzy operatorami przewozów publicznych, organami zarządzającymi ruchem oraz urzędami bezpieczeństwa publicznego przy organizacji imprez masowych dla sprawnego przewozu osób i ładunków w celu zminimalizowania negatywnego oddziaływania na codzienne podróże do pracy,
- koordynacja prac prowadzonych w pasie drogowym z systemem sterowania ruchem w sieci w celu zrównoważenia warunków ruchu,
- koordynacja sygnalizacji świetlnej uwzględniająca mobilność różnych użytkowników ruchu (również spoza badanego obszaru) w celu spełnienia postulatów sprawnego dojazdu do pracy,
- informacja podróżnych o aktualnych warunkach w sieci charakteryzująca się dużą wiarygodnością, aktualnością i istotnością, dzięki odpowiednio opracowanemu serwisowi, który pozyskuje informacje z różnych obszarów, instytucji oraz podsystemów transportu,
- ułatwienie przemieszczania się z wykorzystaniem różnych środków transportu i pomiędzy różnymi obszarami terytorialnymi dzięki wspólnym usługom elektronicznym płatności pomiędzy poszczególnymi organizatorami transportu w zakresie opłaty za przejazd, parkowanie i taryfy,



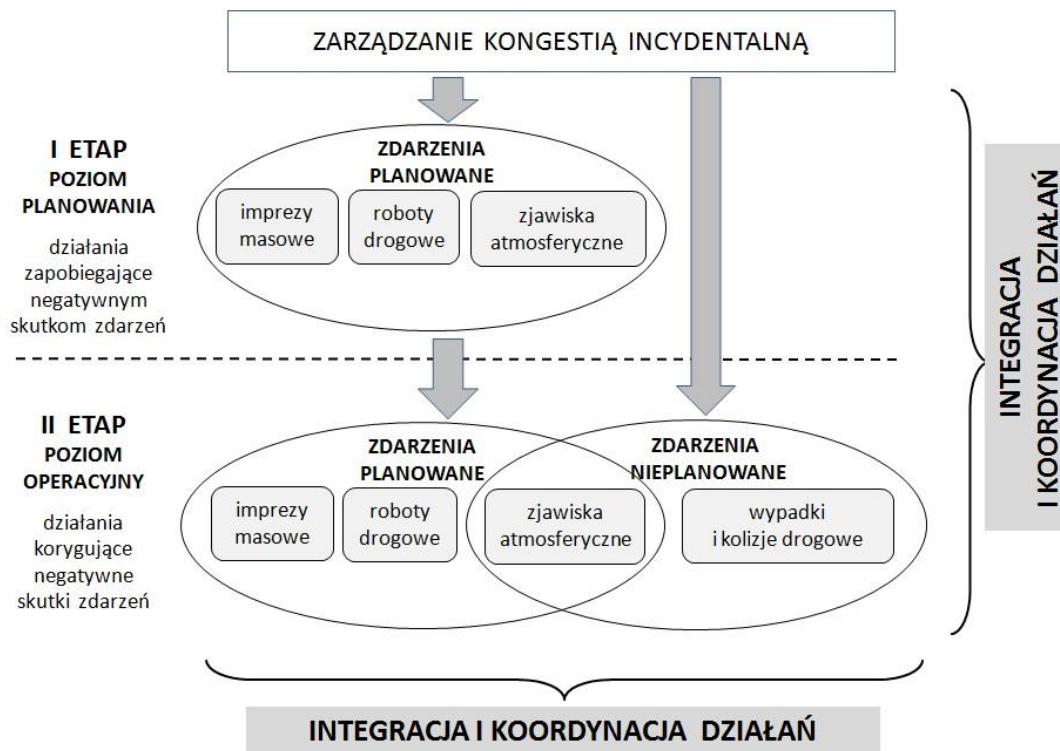
- elektroniczna identyfikacja, monitorowanie, prowadzenie i koordynowanie przewozu materiałów niebezpiecznych przez regionalne organizacje zarządzające ruchem i zajmujące się bezpieczeństwem publicznym,
- opracowanie wspólnie akceptowanych i jednorodnych miar i standardów oceny jakości systemu transportowego wspomagających decyzje inwestycyjne.

Powyższe działania są szczególnie ważne przy występowaniu sytuacji nietypowych prowadzących do kongestii incydentalnej ze względu na to, że zakłócenia powstające w takich przypadkach przyczyniają się do nieakceptowanej zmienności w czasie podróży i prowadzą do silnego stresu wśród użytkowników związanego z niepewnością osiągnięcia miejsca docelowego w określonym czasie [12]. Chociaż przemieszczanie się w cyklicznym zatłoczeniu nie jest ani przyjemne, ani pożądane, może być jednak włączone do planu podróży, jeżeli ma charakter cykliczny. Natomiast nieoczekiwane problemy komunikacyjne związane z awariami czy niewłaściwie zaplanowanymi robotami drogowymi, powodują frustrację wśród użytkowników i przyczyniają się do zwiększenia „wskaźnika uciążliwości”. Redukcja kongestii nieregularnej w sieci drogowej spowoduje zmniejszenie zmienności występowania i czasu trwania kongestii oraz zwiększa możliwości planowania podróży w sposób bardziej przewidywalny. Główne działania w tym zakresie obejmują [3]:

- zarządzanie zdarzeniami drogowymi (ang. *traffic incident management*),
- zarządzanie robotami drogowymi (ang. *work zone management*),
- zarządzanie pogodowe (ang. *road weather management*),
- zarządzanie specjalnymi wydarzeniami (ang. *special events traffic management*).

Na rysunku 3 przedstawiono **zintegrowane podejście** do zarządzania kongestią incydentalną oparte na tych czterech typach działań. Odbywa się ono w dwóch etapach. Etap pierwszy polega na planowaniu zdarzeń mających miejsce w systemie transportowym w taki sposób, aby zapobiegać albo przynajmniej minimalizować negatywne skutki wywołane przez te zdarzenia. Etap drugi polega na podjęciu odpowiednich działań operacyjnych, których zadaniem jest bieżące usuwanie albo korygowanie negatywnych skutków zdarzeń już po ich zajściu. Zdarzenia te zostały podzielone na planowane i nieplanowane, przy czym podział ten nie jest wyłączający się – zjawiska atmosferyczne można zaliczyć zarówno do zdarzeń planowanych ze względu na stosunkowo duży stopień przewidywalności ich zajścia, jak i do nieplanowanych – z powodu nieprzewidywalności w rozmiarze szkód wyrządzonych przez te zjawiska. Dla osiągnięcia optymalnych rezultatów konieczna jest zarówno integracja i koordynacja w układzie poziomym pomiędzy działaniami związanymi z różnymi typami zakłóceń na każdym z etapów, jak również w układzie pionowym pomiędzy poszczególnymi etapami.

**Z punktu widzenia płynnego przepływu potoku ruchu** kongestia stanowi znaczną uciążliwość. W obszarach miejskich jest to spowodowane [3, 18] przede wszystkim mniejszymi odległościami między pojazdami wynikającymi z niższych prędkości. Powoduje to, że sieć transportowa jest szczególnie podatna na zaburzenia płynności ruchu prowadzące do rozprzestrzeniania się tzw. „fali zaburzeniowej” i tworzenia kongestii wtórnej. Określenie związku pomiędzy płynnością ruchu a intensywnością prowadzi do sformułowania **zagadnienia optymalizacji ruchu** w węzle oraz w sieci transportowej [20, 21]. Według J. Wocha [21] optymalny ruch w sieci transportowej warunkowany jest optymalizacją ruchu w poszczególnych elementarnych węzłach tej sieci. Jedyne analiza elementarnej kolizyjności ruchu w węzłach zapewnia dokładną ocenę płynności ruchu. W tym celu J. Woch [21] zaproponował algorytm o charakterze dualnym, pozwalający z jednej strony na wydzielenie węzłów krytycznych (ujęcie „sieciowe”), z drugiej – na określenie potoków zakłóconych (ujęcie „potokowe”).



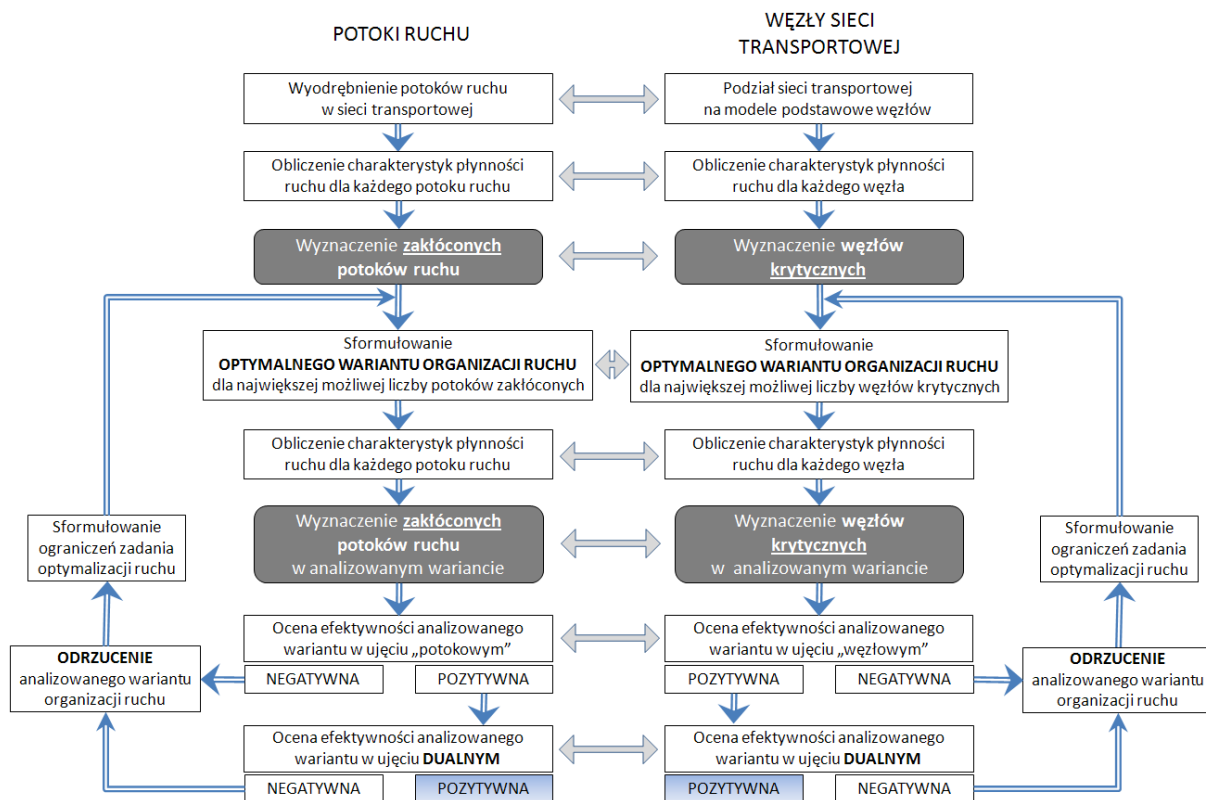
Rys.3. Zintegrowane podejście do zarządzania kongestią incydentalną.

Zmodyfikowany na podstawie publikacji [20] schemat algorytmu przedstawiono na rysunku 4. Pomiędzy blokami na tym samym etapie rozważań występują dwukierunkowe sprzężenia, pozwalające na jednoczesną i komplementarną analizę. Zwykle zakłócenie płynności potoku ruchu ma miejsce w węzłach krytycznych. Z jednej strony więc zakłócony potok wskazuje miejsce potencjalnych największych korzyści z poprawy organizacji ruchu, z drugiej – struktura kolejek w złożonych węzłach krytycznych odwzorowuje rezerwy przepustowości w ich węzłach elementarnych, pozwalając na sformułowanie optymalnego wariantu organizacji ruchu. Ponadto algorytm optymalizacji ruchu w sieci transportowej zawiera dwie pętle iteracyjne pozwalające na wybór najlepszego wariantu według różnych kryteriów.

## PODSUMOWANIE

Problem minimalizacji negatywnych skutków kongestii w obszarach zurbanizowanych wymaga podjęcia odpowiednich działań związanych z zarządzaniem na różnych poziomach. W nowoczesnych miastach tradycyjne metody związane z rozbudową infrastruktury drogowej nie są wystarczające. Dopiero kompleksowe i systemowe podejście oparte na różnych strategiach zarządzania kongestią może przynieść pożądane rezultaty. Najlepsze wyniki uzyskuje się przy właściwej koordynacji oraz integracji działań planistów, projektantów i operatorów ruchu.

W artykule przedstawiono dualne podejście do optymalizacji ruchu w oparciu o założenia płynnego przepływu potoku przez elementy sieci transportowej. Wybór najlepszego wariantu organizacji ruchu jest procesem iteracyjnym, w którym kolejne rozwiązania są poprawiane zarówno z punktu widzenia najbardziej zakłóconych potoków ruchu, jak i krytycznych węzłów sieci, charakteryzujących się najgorszymi wartościami miar oceny warunków ruchu. Analizy takie należy przeprowadzać na jak największym poziomie dokładności (dla węzłów elementarnych).



Rys.4. Schemat algorytmu optymalizacji ruchu w sieci transportowej (na podstawie [20, 21]).

### Streszczenie

Kongestia rozumiana jako zatłoczenie komunikacyjne stanowi istotny czynnik zwiększający uciążliwość życia i przemieszczania się w obszarach miejskich. Działania minimalizujące negatywne skutki takich sytuacji powinny być podejmowane na różnych poziomach zarządzania ruchem: strategicznym, taktycznym oraz operacyjnym. Wymaga to ścisłej współpracy i koordynacji pomiędzy planistami, projektantami oraz operatorami ruchu drogowego. W artykule przedstawiono strategię zarządzania kongestią w miastach. Zaprezentowano także koncepcję zintegrowanego podejścia do tego zagadnienia w kontekście płynności ruchu.

## Managing traffic congestion in urban networks – selected issues

### Abstract

Traffic congestion is an important factor for increasing inconvenience of life and travelling in urban areas. Activities to minimize the negative effects of such situations should be taken at different levels of traffic management: strategic, tactical and operational. This requires close cooperation and coordination between planners, designers and traffic operators. The article presents strategies for managing traffic congestions in the cities. The concept of an integrated approach to this issue in the context of the smoothness of traffic flows has been also proposed.

### BIBLIOGRAFIA

1. Bertini R., You are the Traffic Jam: An Examination of Congestion Measures. Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C. 2006.
2. Bojarski W., Podstawy inżynierii systemów. PWN, Warszawa 1984.
3. Cambridge Systematics, Inc., Traffic Congestion and Reliability. Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation. Final Report prepared for FHWA (September, 2005).
4. Chwesiuk K., System transportowy, proces transportowy i gałęziowe procesy przewozowe. Katowice, Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, 2009, s.45-62.

5. Cichocki P., Jabkowski P., Kaczmarek M., Inteligentne systemy sterowania ruchem – perspektywa ekspercka a perspektywa potoczna. Studium zachowań poznańskich kierowców. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Poznań 2009.
6. Dargay J.M., Goodwin P.B., Traffic Congestion in Europe. Introductory Report England. OECD Report, 1999.
7. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2008.
8. Grant-Muller S., Laird J., Costs of Congestion: Literature based Review of Methodologies and Analytical Approaches. Scottish Executive Social Research, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2006.
9. Igliński H., Ograniczanie poziomu kongestii transportowej a zrównoważony rozwój miast. Praca doktorska, Wydział Gospodarki Międzynarodowej Uniwersytetu Ekonomicznego, Poznań, 2009.
10. Letkiewicz A., Gospodarowanie w transporcie samochodowym. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2006.
11. Middelham F., State of Practice in Dynamic Traffic Management in the Netherlands. [w:] V Konferencja Naukowo – Techniczna SITK nt. „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia komunikacyjnego” – Poznań 2005.
12. OECD Report, Managing urban traffic congestion. European Conference of Ministers of Transport Report, OECD Publishing, Paris 2007.
13. Pawłowska B., Zewnętrzne koszty transportu, problemy ekonomicznej wyceny. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2000.
14. Sobota A., Płynność ruchu w świetle badań naukowych. Katowice, Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, 2009, s. 457-464.
15. Sobota A., Karoń G., Postrzeganie warunków ruchu miejskiego – płynność ruchu – wyniki badań. Zeszyty Naukowo – Techniczne SITK RP. Oddział w Krakowie. Kraków 2009, s.215–234.
16. Szarata A., Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa, Monografia nr 439, Kraków 2013.
17. Szarata A., Modelowanie ruchu tłumionego w ujęciu symulacyjnym. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, oddział w Krakowie. Seria: Materiały konferencyjne, nr 94 (zeszyt 153), Kraków 2010, str. 269 - 282.
18. Szoltysek J., Podstawy logistyki miejskiej. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice, 2007.
19. Szymanek A., Sterowanie ruchem w transporcie – koncepcja podstaw teoretycznych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, z.35, Warszawa 1996.
20. Woch J., Aktualna wersja teorii płynności ruchu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport, z.58. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005, s.375-386.
21. Woch J., Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Polska Akademia Nauk – oddział w Katowicach, Komisja Transportu. Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.
22. Żochowska R., Karoń G., Przegląd literatury na temat zjawiska kongestii i zakłóceń ruchu w systemie transportowym miasta w aspekcie modelowania podróży. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP o/Kraków, Nr 98, Kraków 2012, s.251-276.
23. Żochowska R., Karoń G., Sobota A., Modelowanie procesów decyzyjnych podróży w transporcie publicznym. [w:] Nowoczesny transport w obszarach zurbanizowanych. Materiały konferencyjne pod red. A. Krycha. SITKRP, oddział w Poznaniu, 2011, s. 113 – 144.
24. 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. SITKRP, oddział w Poznaniu, Politechnika Poznańska Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Poznań 2013, s. 401 – 420.
25. Żochowska R., Sobota A., Fundamentalny diagram ruchu – teoria i praktyka. Logistyka 6/2014.