

PRZEGLĄD LITERATURY NA TEMAT ZJAWISKA KONGESTII I ZAKŁÓCEŃ RUCHU W SYSTEMIE TRANSPORTOWYM MIASTA W ASPEKTCIE MODELOWANIA PODRÓŻY¹

Renata Żochowska

dr inż., Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu,
Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego
8, tel. +48 32 603 4121, e-mail: renata.zochowska@
polsl.pl

Grzegorz Karoń

dr inż., Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu,
Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego
8, tel. +48 32 603 4159, e-mail: grzegorz.karon@polsl.
pl

Streszczenie. System transportowy podlega różnym zakłóceniom, których źródeł należy szukać zarówno w obszarze funkcjonalno-użytkowym (np. brak odpowiedniej efektywności w odniesieniu do wielkości popytu), w obszarze techniczno-eksploatacyjnym (np. roboty drogowe prowadzące do całkowitego lub częściowego zamknięcia elementów sieci), jak również w obszarze związanym z czynnikami losowymi (np. niekorzystne warunki atmosferyczne, działania terrorystyczne, wypadki i kolizje drogowe). Zdarzenia te prowadzą do zmniejszenia przepustowości elementów sieci transportowej oraz obniżenia poziomu swobody ruchu. W efekcie tego często powstaje zatłoczenie (kongestia) a wywołane nim straty czasu powodują spadek jakości przemieszczania. W artykule, na podstawie dostępnej literatury, przedstawiono przegląd i klasyfikację czynników wpływających na występowanie kongestii i zakłóceń w ruchu drogowym.

Konsekwencje zakłóceń w sieci drogowej są znacznie szersze niż wzrost czasu podróżowania i powinny być rozpatrywane jako problem zredukowanej efektywności całego systemu transportowego w mieście. Proces powstawania ruchu w systemie transportowym opisywany jest często w postaci czterostopniowego (klasycznego) modelu podróży jako efekt sekwencyjnego podejmowania decyzji dotyczących potrzeb i czasu przemieszczania (transportu), wyboru miejsca docelowego, środka transportu oraz drogi przemieszczania. W takim ujęciu szeroki zakres oddziaływania zakłóceń wiąże się z koniecznością uwzględnienia ich wpływu na każdym z etapów procesu decyzyjnego.

Słowa kluczowe: kongestia, zakłócenie, system transportowy, modelowanie podróży

Wstęp

Złożoność procesu przemieszczania się osób i przewozu towarów w miejskiej sieci transportowej wynika zarówno z rozproszenia przestrzennego aktywności społecznej i gospodarczej, jak i nieliniowości charakterystyk ruchu, obejmującej również ich niestacjonarność i niejednorodność. Ponadto w miejskich systemach transportowych zróżnicowane potrzeby użytkowników konkurują w tym samym

¹ Wkład autorów w publikację: Żochowska R. 50%, Karoń G. 50%

czasie o ograniczoną pojemność elementów sieci drogowej. Prowadzi to do zakłócenia stanu równowagi w sieci miejskiej², a w efekcie często do kongestii, której bezpośrednim skutkiem jest powstawanie znacznych kolejek, zatorów komunikacyjnych, a nawet zablokowanie części miasta dla ruchu. Zjawiska te z kolei mogą być bezpośrednią przyczyną obniżenia bezpieczeństwa, sprawności i efektywności podróżowania oraz wpływać negatywnie na środowisko i zdrowie mieszkańców. Zachwianie strukturalne sprawnego działania systemu transportowego w obszarze miejskim powoduje zakłócenia w funkcjonowaniu całej jednostki osadniczej jako systemu.

Przyczyny powstawania kongestii cyklicznej i przypadkowej

Kongestia jest definiowana w różny sposób. Samo pojęcie **kongestii** należy rozumieć jako sytuację, w której większa liczba nabywców ubiega się o pewne dobro, które nie może być dostarczone w formie oddzielnych jednostek [14, 41]. Istotą kongestii jest wzajemne oddziaływanie użytkowników na siebie powodujące negatywne skutki eksploatacyjne i ekonomiczne. Z eksploatacyjnego punktu widzenia **kongestia transportowa** oznacza różnicę w kosztach zasobów między siecią drogową, funkcjonującą w warunkach rzeczywistych a siecią eksploatowaną w warunkach idealnych, gdzie nie występują straty czasu a ruch odbywa się z maksymalnie bezpieczną prędkością [34]. Kongestię transportową definiuje się również jako wzajemne utrudnianie ruchu przez pojazdy, będące konsekwencją obiektywnej zależności między prędkością przemieszczania się a wielkością przepływu, w warunkach, gdy stopień wykorzystania pojemności systemu transportowego zbliża się do wartości granicznych [13].

Specyficzne mechanizmy związane z powstawaniem kongestii w sieci transportowej różnią się w zależności od klasy drogi. Kongestia na odcinkach umożliwiających nieprzerwany potok ruchu (np. autostrady, drogi ekspresowe), nie pojawia się w ten sam sposób i z tych samych przyczyn, co kongestia na odcinkach charakteryzujących się przerywanym potokiem ruchu, jak te zlokalizowane w gęstych sieciach miejskich.

Zakłócenia w sieci transportowej miasta można ogólnie podzielić na **typowe i nietypowe**.

Zakłócenia typowe wywołane są **nierównomiernością** popytu transportowego w czasie i przestrzeni i mają **charakter cykliczny** w określonym horyzoncie czasu. Bezpośrednim skutkiem zakłóceń wynikających ze zbyt dużego zapotrzebowania na transport, pojawiającego się w szczytach poszczególnych cykli (godzinowych, dobowych, tygodniowych, sezonowych, rocznych) w stosunku do ograniczonej przepustowości jest **kongestia cykliczna** (strukturalna) (ang. *recurring*

2 Według Tundys [42] osiągnięcie stałej równowagi w sieci miejskiej jest niemożliwe ze względu na nierównomierny rozwój poszczególnych elementów warunkujących sprawne funkcjonowanie miasta, prowadzący do sprzeczności i napięć wewnętrznych. W tym kontekście można mówić jedynie o równowadze przejściowej, po której następują okresy destabilizacji.

congestion, recurrent congestion) [15]. Jest ona konsekwencją czynników, które oddziałują regularnie lub okresowo na system transportowy. Innymi przyczynami tego typu kongestii może być także niedorozwój infrastruktury transportowej lub jej niewłaściwe zaprojektowanie, źle skonfigurowana sygnalizacja świetlna czy występowanie przejazdów kolejowych. Zjawisko kongestii cyklicznej jest szczególnie uciążliwe w **okresach szczytu ruchowego**, który w niektórych obszarach miasta może obejmować znaczny okres doby [22]. Kongestia cykliczna może również wykazywać duży stopień losowości, szczególnie z punktu widzenia czasu trwania i konsekwencji zakłóceń. **Zakłócenia typowe** są zazwyczaj charakterystyczne dla tych elementów sieci transportowej, gdzie przepustowość jest niewystarczająca dla zaspokojenia potrzeb transportowych. Miejsca takie charakteryzują się dużą podatnością na zakłócenia i stanowią tzw. „wąskie gardła” systemu. Przykład analizy warunków ruchu w całej sieci aglomeracji górnośląskiej (okres 2007-2008), z identyfikacją wąskiego gardła, oceną zmienności warunków ruchu i wywołanych zakłóceń, przedstawiono w [21, 23, 24].

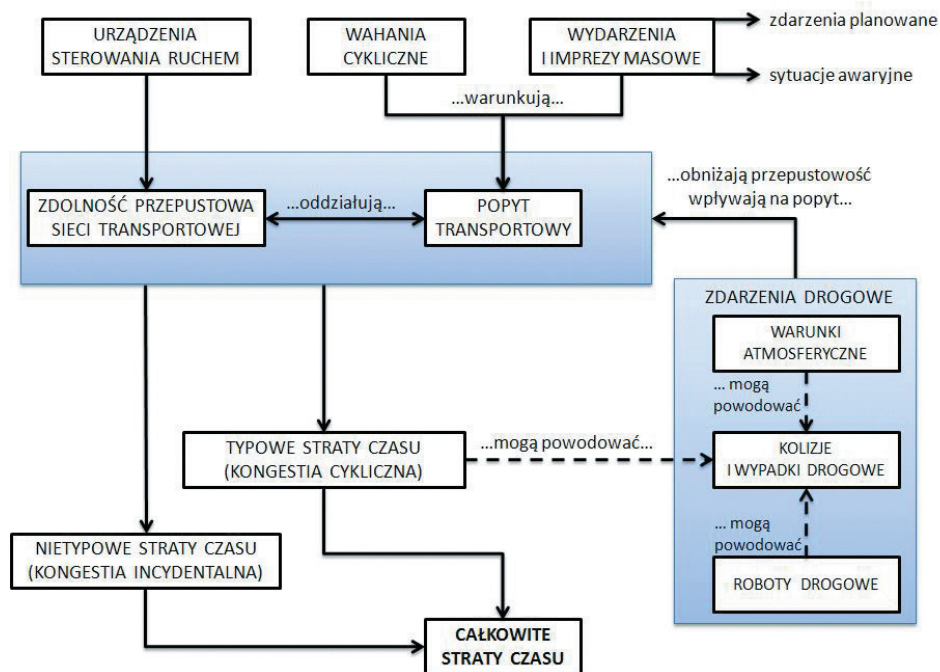
Nie wszystkie zakłócenia spowodowane są niewystarczającą zdolnością przepustową elementów sieci. **Zakłócenia nietypowe**, traktowane jako efekt szczególnych chwilowych warunków lub okoliczności, mogą być spowodowane występowaniem zdarzeń losowych (m.in. awariami urządzeń podziemnych lub awariami występującymi na obiektach komunikacyjnych), robotami inżynieryjnymi prowadzonymi w pasie drogi lub w bezpośrednim jej sąsiedztwie oraz imprezami, wymagającymi wprowadzenia odpowiedniej organizacji ruchu, ze względu na wykorzystanie jezdni lub gromadzenie dużej liczby osób w jednym obszarze. Przyczynami zakłóceń nietypowych mogą być również różnego rodzaju zdarzenia drogowe (np. wypadki, kolizje drogowe, wyciek oleju, itp.), niekorzystne warunki atmosferyczne (np. intensywne opady śniegu, powodzie, osuwiska skalne), chwilowy zły stan nawierzchni czy nawet ataki terrorystyczne. Zakłócenia nietypowe prowadzą do powstania **kongestii przypadkowej** (incydentalnej) (*random congestion, non-recurring congestion*) [15, 19]. Prawdopodobieństwo powstania i rozmiar kongestii, powstałej w wyniku zakłóceń nietypowych, są zróżnicowane w zależności od typu sieci i jej podatności na zakłócenia, związanej m.in. z efektywnością działań dotyczących zarządzaniem ryzykiem, właściwym planowaniem robót drogowych czy sprawnością w usuwaniu przeszkód w płynnym przemieszczaniu się pojazdów.

Podczas, gdy większość zakłóceń nietypowych wywołuje podobne negatywne konsekwencje dla ruchu drogowego, nie wszystkie z nich charakteryzują się jednakowym stopniem losowości, czy trudnościami we wcześniejszym ich przewidzeniu. Przykładowo, większość awarii ma charakter nieprzewidywalny ze swej natury, natomiast miejsca szczególnie niebezpieczne ze względu na występowanie kolizji i wypadków można zidentyfikować na podstawie analizy statystycznej, określonych parametrów geometryczno-ruchowych czy analizy wyposażenia w urządzenia zabezpieczenia ruchu. Podobnie, roboty drogowe mogą być zarządzane w taki sposób, aby zminimalizować ich wpływ na płynność ruchu, poczynwszy od prowadzenia prac w porze nocnej aż do całkowitej zmiany organizacji ruchu, ingerującej w geometrię skrzyżowania. W opracowaniu [37] przedstawiono wyniki badań

przepustowości skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, na którym wprowadzono tymczasową nową organizację ruchu – z wyspą centralną. Zmiany związane były z pracami remontowymi torowiska tramwajowego, przecinającego skrzyżowanie. W czasie robót wybudowano wyspę centralną, co wiązało się z koniecznością zmiany organizacji ruchu oraz programu sygnalizacji świetlnej. Rozwiązanie to okazało się bardzo dobre, ponieważ warunki ruchu nie uległy pogorszeniu. Co więcej, przeprowadzone obliczenia wykazały, że sprawność ruchu w tym miejscu wzrosła. Wskazują na to między innymi wybrane miary jakościowe i ilościowe warunków ruchu (większa o ok. 16,5% wartość przepustowości, niższy stopień obciążenia skrzyżowania, mniejsze (prawie trzykrotnie) globalne straty czasu na skrzyżowaniu, poziom swobody ruchu (PSR) III, a nie IV, mniejsze wartości wskaźnika liczby zatrzymań i wskaźnika udziału pojazdów zatrzymanych).

Nawet z uciążliwymi warunkami atmosferycznymi, choć niemożliwymi do zmiany (przynajmniej na razie), można sobie lepiej radzić poprzez systemy aktywnego zarządzania prędkością i przygotowanie planów awaryjnych, które mogą znacznie zmniejszyć negatywny wpływ na ruch drogowy.

Sposób kształtowania się kongestii z punktu widzenia oddziaływania różnego rodzaju zakłóceń przedstawiono w raporcie [35] oraz na rysunku 1.



Rys. 1. Kształtowanie zakłóceń i związanych z nimi strat czasu w sieci drogowej

Źródło: Opracowanie na podstawie [35]

Reasumując, zakłócenia typowe są spowodowane strukturalnym deficytem przepustowości lub wzrostem popytu transportowego, podczas gdy źródłem zakłóceń nietypowych jest incydentalny brak przepustowości lub nadwyżka

popytu transportowego. Warto zauważyć, że nawet w przypadku kongestii typowej, charakterystyki ruchu mogą się zmieniać w kolejnych dniach, prowadząc do niepewności w precyzyjnym określeniu miejsca i momentu tworzenia się i zanikania kolejek pojazdów oraz szacowaniu wielkości czasu traconego w zatorze komunikacyjnym³. Stąd głównym czynnikiem przy analizie wpływu kongestii na zachowania podróżnych, oprócz strat czasu wynikających z wydłużenia czasu przeemieszczania, jest niezawodność lokalizacji kolejki, czasu jej trwania i momentu rozpoczęcia [30].

3. Źródła zakłóceń w sieci transportowej miasta

W gęstych sieciach transportowych zlokalizowanych w obszarach miejskich istnieje wiele źródeł zakłóceń, które nierzadko występują łącznie, przyczyniając się do powstawania kongestii. Stąd często niemożliwe jest wskazanie jednej zasadniczej przyczyny problemów komunikacyjnych, czy ustalenia ich hierarchii. Według [35] wyróżniono siedem podstawowych źródeł zakłóceń prowadzących do kongestii w sieci drogowej⁴, tj:

- **ograniczona przepustowość elementów sieci** – zależna od wielu czynników, np. w odniesieniu do odcinków - liczby jezdni, liczby pasów ruchu oraz ich szerokości, obecności pobocza i jego szerokości; w odniesieniu do skrzyżowań – geometrii i sposobu organizacji ruchu; w odniesieniu do sieci – charakterystyki miejsc niekorzystnych z punktu widzenia płynności ruchu, tj. punktów poboru opłat, punktów kontroli pojazdów, miejsc zwężeń i innych,
- **zdarzenia drogowe** – kolizje, wypadki i awarie pojazdów oraz inne sytuacje, mające miejsce na jezdni oraz poza nią (np. zdarzenia na poboczu, incydenty w obszarze widoczności kierowców, które mogą skutecznie odwrócić ich uwagę, powodując ograniczenie ich prędkości), w wyniku których dochodzi do utrudnień w ruchu,
- **roboty drogowe** – prowadzące często do reorganizacji ruchu, (np. ograniczenia liczby pasów lub ich przesunięcia, zmniejszenia szerokości pasów,

3 W wielu pracach podkreśla się, że dychotomia polegająca na uznaniu zakłóceń typowych jako przewidywalne, a nietypowych jako losowe nie jest prawdziwa [31]. Wyniki badań prowadzonych na poziomie mikroskopowym pokazują stochastyczny charakter zakłóceń typowych. Pomimo podobnego poziomu wielkości ruchu i gęstości, pomijając sytuacje związane z występowaniem czynników przypadkowych, podróżny na tym samym odcinku drogi w określonym momencie tego samego dnia tygodnia może doświadczać trzech różnych sytuacji: braku zatłoczenia, kongestii o niskim lub wysokim poziomie. Podobnie, pomimo oczekiwań podróżnego, który doświadczył wcześniej w określonym miejscu problemów zatłoczenia w okresie szczytu, czasami kolejki się nie pojawiają.

4 W raporcie [35] pogrupowano te czynniki na trzy zasadnicze kategorie:

- Grupa I – czynniki wpływające **na płynność ruchu pojazdów** (zdarzenia drogowe, roboty drogowe, warunki atmosferyczne),
- Grupa II – czynniki wpływające **na zmiany popytu** (nierównomierność czasowo-przestrzenna popytu, specjalne wydarzenia),
- Grupa III – czynniki stanowiące **fizyczne cechy infrastruktury** (ograniczona przepustowość elementów sieci, urządzenia regulacji ruchu).

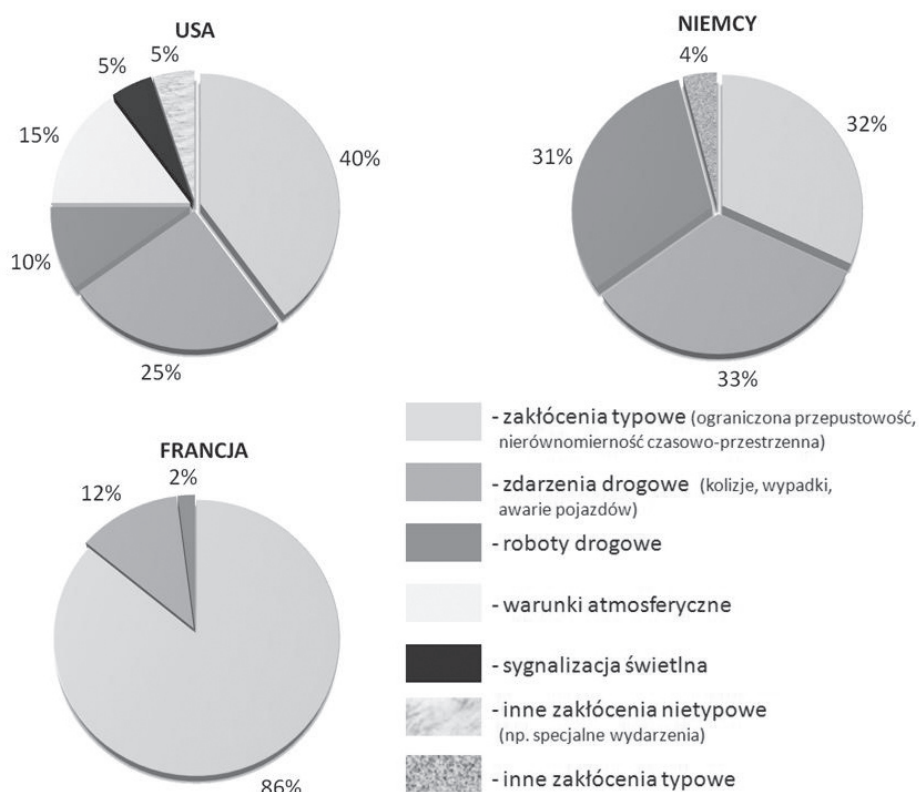
usunięcia pobocza, skierowania ruchu na drogę objazdową, czasowego wyłączenia odcinka z ruchu), której efektem może być zwiększone ryzyko wypadku czy poziomu zatłoczenia,

- **warunki atmosferyczne** – prowadzące do zmiany zachowań kierowców, powodując zmniejszenie prędkości oraz zwiększenie odległości między pojazdami,
- **urządzenia regulacji ruchu** – niewłaściwie skonfigurowane programy sygnalizacyjne oraz nieprawidłowy dobór typu sygnalizacji, podobnie jak występowanie przejazdów kolejowych z rogatkami, zakłócają ruch, prowadząc do ograniczenia przepustowości i wahań czasu podróży,
- **wydarzenia i imprezy masowe** – imprezy sportowe, kulturalne, festyny oraz parady z okazji świąt narodowych prowadzące do nietypowego wzrostu ruchu w pobliżu miejsc, gdzie te wydarzenia się odbywają, powodując lokalne przeciążenie systemu transportowego,
- **nierównomierność czasowo-przestrzenna popytu** – wynikająca ze zmienności ruchu w poszczególnych dniach tygodnia w określonych relacjach (np. inny rozkład czasowy i przestrzenny ruchu w typowe dni robocze, w dni weekendowe oraz w dni „przejściowe” – piątek i poniedziałek) [22].

Źródła zakłóceń mogą być pojedyncze, jak również złożone, będące kombinacją poszczególnych typów. Stopień oddziaływania pomiędzy pojedynczymi rodzajami źródeł różni się znacznie zarówno w czasie (w poszczególnych okresach doby i dniach), jak i w przestrzeni (na poszczególnych elementach sieci). Jedne czynniki powodują powstawanie kolejnych. Przykładowo [35]:

- **nietypowo wysoka kongestia** może prowadzić do przeniesienia ruchu na inne drogi lub spowodować późniejszy wyjazd użytkowników, zmianę miejsc docelowych lub rezygnację z przemieszczenia,
- **wysoki poziom kongestii** może prowadzić do wzrostu liczby zdarzeń drogowych spowodowanych bliskością pojazdów w przestrzeni oraz przegrzewaniem pojazdów podczas miesięcy letnich,
- **złe warunki atmosferyczne** prowadzą do wypadków i kolizji drogowych,
- **zakłócenia w ruchu i zachowania kierowców zainicjowane przez zdarzenia drogowe** mogą prowadzić do wtórnych zdarzeń drogowych (np. awarie pojazdów).

Istnieje wiele różnorodnych sposobów grupowania czynników wpływających na ruch drogowy, co powoduje trudności w prowadzeniu analiz porównawczych dla różnych obszarów. Na rysunku 2 zamieszczono wyniki badań statystycznych prowadzonych w różnych krajach. Najbardziej szczegółowe analizy, z punktu widzenia przyczyn zakłóceń, prowadzone są w USA, najmniej szczegółowe – we Francji, gdzie wydzielono jedynie trzy grupy. W rozkładzie przyczyn zakłóceń występuje także znaczna różnorodność w poszczególnych krajach.



Rys. 2. Wyniki analiz przyczyn zakłóceń w różnych krajach

Źródło: Opracowanie na podstawie [31]

Inny podział czynników powodujących kongestię w miastach przedstawiono w publikacji [29] wydzielając czynniki bezpośrednie i pośrednie, zaprezentowane w tabeli 1. Jako uzupełnienie, w pracy [19] wskazano również **niekorzystne zachowania polskich kierowców**, tj.:

- zbyt mała dynamika przy opuszczaniu skrzyżowań wyposażonych w sygnalizację świetlną,
- blokowanie skrzyżowania poprzez wjeżdżanie na nie w sytuacji, gdy niemożliwe jest jego szybkie opuszczenie,
- wjeżdżanie na skrzyżowanie przy wyświetlaniu niewłaściwego sygnału,
- prowadzenie pojazdu z prędkością przekraczającą wartość dopuszczalną,
- brak kultury jazdy (m.in. uniemożliwianie tzw. „jazdy na suwak” przy zwichnięciach dróg, blokowanie wyjazdu z dróg podporządkowanych),
- niedostateczna koncentracja na prowadzeniu pojazdu.

Tabela 1. Czynniki wpływające na kongestię w miastach według {29}

Czynniki bezpośrednie	strukturalne	- struktura przestrzenna obszaru, - układ i zdolność przepustowa sieci drogowej i pozostałych gałęzi transportu w odniesieniu do wielkości popytu.
	technologiczne	- stan techniczny sieci ulicznej, - sposób kontroli i zarządzania ruchem, - techniczne uwarunkowania funkcjonowania komunikacji miejskiej.
Czynniki pośrednie	społeczne	- poziom zamożności społeczeństwa, - model stylu życia, - świadomość negatywnych skutków eksploatacji samochodu.
	funkcjonalne	- stopień koncentracji i lokalizacja działalności gospodarczej aktywizującej społeczeństwo.
	geograficzne	- cechy topograficzne terenu, - gęstość zaludnienia, - budowa geologiczna podłoża.
	ekonomiczne	- wysokie koszty inwestycji transportowych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie {19, 29}

Zakłócenia w ruchu drogowym mogą być wywołane przez **zdarzenia planowane i nieplanowane**. Do **zdarzeń planowanych** należy zaliczyć określone przedsięwzięcia związane z budową, utrzymaniem czy modernizacją składników infrastruktury drogowej oraz specjalne wydarzenia, których efektem jest częściowe lub całkowite zamknięcie elementu sieci transportowej [46, 47]. Zdarzenia te ujęte są w formie określonego harmonogramu robót drogowych zawierającego m.in. czas trwania zdarzenia oraz wariant organizacji ruchu w czasie jego realizacji. Odpowiednia organizacja zdarzeń planowanych oraz ich rozłożenie w czasie i przestrzeni może wpływać na minimalizację zakłóceń w gęstych sieciach miejskich. **Zdarzenia nieplanowane** nie są uwzględniane w harmonogramach. Mogą to być awarie elementów infrastruktury technicznej sieci oraz różnego rodzaju incydenty drogowe.

Zakłócenia mogą być klasyfikowane również w zależności od celu badania i związanych z tym kryteriów. Przykładowo biorąc pod uwagę **czas trwania** można wyróżnić zakłócenia **krótkoterminowe** (chwilowe) – odnoszone do godziny i mierzone w sekundach, **średnioterminowe** – odnoszone do doby i mierzone w minutach oraz **długoterminowe** – odnoszone do dłuższego horyzontu czasu i mierzone w dobach. W każdym przypadku wymagane są inne specyficzne rozwiązania organizacyjne związane z określonymi poziomami zarządzania.

Analizując stopień zajętości elementu sieci transportowej można wyodrębnić zakłócenia **punktowe i liniowe**. Przykładami zakłóceń punktowych mogą być m.in.: wypadki i kolizje drogowe czy też, potencjalnie, elementy sieci wyposażone w urządzenia regulacji ruchu np. skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, przejazdy kolejowe itp. Zakłócenia liniowe wynikają z zajęcia części liniowego elementu infrastruktury drogowej spowodowanego m.in. prowadzeniem robót na dłuższym odcinku czy przemieszczaniu się większej grupy osób (np. pielgrzymki, demonstracje, kondukty pogrzebowe, większe zgromadzenia publiczne).

Z punktu widzenia zmienności lokalizacji zakłócenia w czasie można wyróżnić **zakłócenia stałe i ruchome**. Zakłócenia stałe zlokalizowane są w jednym miejscu w analizowanym przedziale czasu, natomiast lokalizacja zakłóceń ruchomych

zmienia się w analizowanym okresie. Przykładami mogą być np. roboty drogowe prowadzone na odcinku drogi (np. wymiana nawierzchni na pasie, odnawianie znaków poziomych, koszenie trawy na pasie rozdzielającym lub poboczu), których technologia wymaga stopniowego przesuwania zamkniętej części odcinka w ramach postępowania robót.

W pracy [36] na potrzeby badań **postrzegania warunków ruchu przez użytkowników** sieci miejskiej, wydzielono cztery grupy zakłóceń (**ruchowe, atmosferyczne, losowe, zaplanowane**), precyzując dokładnie przyczyny ich powstawania (tabela 2).

Tabela 2. Przyczyny powstawania zakłóceń według [36]

Zakłócenia ruchowe	Zakłócenia atmosferyczne	Zakłócenia losowe	Zakłócenia zaplanowane
<ul style="list-style-type: none"> - zwiększenie natężenia ruchu, - wzrost gęstości sieci w obszarach zurbanizowanych, - wpływ innych użytkowników dróg, - zły stan nawierzchni drogowej, - błędy w organizacji ruchu, - błędy w rozwiązaniach geometrycznych, - błędy w planowaniu i organizacji miejsc parkingowych, - czynnik ludzki. 	<ul style="list-style-type: none"> - silne opady śniegu i deszczu, - gołoledź i zlodowacenie jezdni, - mgły, - silny wiatr, - ostre słońce i wysokie temperatury. 	<ul style="list-style-type: none"> - wypadki i zdarzenia drogowe, - usterki systemów organizacji ruchu, - usterki pojazdów na drogach, - inne. 	<ul style="list-style-type: none"> - zmiany w organizacji ruchu, - zwiężenia jezdni na skutek wykonywanych robót drogowych, - budowa na środku jezdni konstrukcji zmniejszających prędkość jazdy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [36]

Według klasyfikacji zakłóceń [36], związanej z **postrzeganiem przez kierowców** płynności ruchu, **zakłócenia ruchowe** wynikają przede wszystkim z wzajemnego oddziaływania użytkowników jezdni, co ma miejsce zarówno w przypadku zwiększonego natężenia ruchu, jak też braku segregacji poszczególnych kategorii użytkowników systemu transportowego oraz nieumiejętnego lub niebezpiecznego prowadzenia pojazdu (np. brawura, łamanie przepisów ruchu drogowego, nieprzewidywalne zachowania). Ponadto obszary zurbanizowane charakteryzują się wyższym poziomem gęstości sieci, powodującym konieczność wykonywania większej liczby manewrów przez prowadzących pojazdy. W efekcie zwiększa się liczba punktów kolizji, w których płynność ruchu zostaje zakłócona. Nie bez znaczenia są również błędy popełniane przez jednostki zajmujące się planowaniem, projektowaniem czy bieżącym utrzymaniem elementów układu drogowego⁵.

⁵ Należy tu wymienić m.in. nieprawidłowe rozmieszczenie miejsc parkingowych, ich niedostateczną liczbę lub organizację, niewłaściwe szerokości pasów ruchu, błędy popełniane przy projektowaniu drogi w planie oraz przekrojach podłużnych i poprzecznych, niewystarczająca widoczność drogi, nieodpowiednie oznakowanie poziome i pionowe, czy też parametry sterowania dobrane niezgodnie z bieżącą sytuacją drogową [36].

Zakłócenia atmosferyczne często powodują konieczność zmniejszenia prędkości, co może wpływać na pogorszenie warunków ruchu. Szczególnie uciążliwe dla kierowców podróżujących w pojazdach bez klimatyzacji mogą być wysokie temperatury występujące w sezonie letnim, prowadząc do zmęczenia i złego samopoczucia, co może być bezpośrednim powodem kolizji lub wypadków drogowych, których skutkiem są **zakłócenia losowe**. Inne zakłócenia tego typu wynikają głównie z awarii pojazdów oraz urządzeń regulujących ruch np. sygnalizacja świetlna, znaki i tablice zmiennej treści.

Specyficzną grupę wśród **zaplanowanych zakłóceń** oprócz zakłóceń, które spowodowane są zmianami w organizacji ruchu czy też całkowitym lub częściowym ograniczeniem przekroju drogi na skutek robót drogowych czy imprez masowych, stanowią zakłócenia wynikające z umieszczenia w przekroju jezdni **urządzeń uspokojenia ruchu**⁶. Rozwiązania takie stosuje się głównie w miejscach o dużym natężeniu ruchu pieszego i rowerowego, gdyż właśnie ten ruch jest najbardziej narażony na ujemne skutki ruchu kołowego. Wprowadzenie odpowiednich rozwiązań uspokojenia ruchu ma na celu zarówno poprawę brd, jak i uporządkowanie przestrzeni ruchu, poprawę krajobrazu, warunków środowiskowych oraz ułatwienie komunikacji wewnętrznej. Cele te realizowane są m.in. poprzez redukcję prędkości w obszarach zurbanizowanych, którą można uzyskać poprzez stworzenie takiego środowiska drogowego, które uniemożliwi lub znacznie utrudni jazdę z nadmierną prędkością [6].

Syntetyczne podejście do przyczyn zakłóceń przedstawiono również w pracy [17], dzieląc czynniki zakłócające funkcjonowanie systemu transportowego na trzy grupy⁷ (rys. 3):

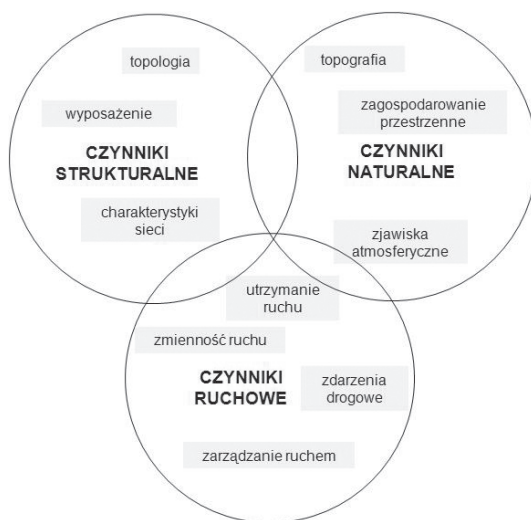
- **strukturalne** – odnoszące się do topologii, wyposażenia i charakterystyk sieci,
- **naturalne** – odnoszące się do topografii i zagospodarowania przestrzennego obszaru oraz zjawisk atmosferycznych,
- **ruchowe** – odnoszące się do zmienności ruchu, sposobów zarządzania i utrzymania ruchu oraz zdarzeń drogowych.

Czynniki te rzadko występują pojedynczo – zakłócenia często wywoływane są przez kilka czynników (również należących do różnych grup⁸) jednocześnie.

6 **Uspokojenie ruchu** polega na odpowiednim kształtowaniu środowiska drogowego za pomocą środków planistycznych i inżynierskich, celem osiągnięcia kompleksowego efektu poprawy bezpieczeństwa ruchu, zmniejszenia uciążliwości transportu i polepszenia przestrzeni publicznej w obszarach zabudowanych. Cele te uzyskuje się poprzez spowodowanie pożądanych zachowań uczestników ruchu i zapobieganie zachowaniom niepożądanym [6].

7 W pracy [18] zasugerowano wprowadzenie czwartej grupy czynników obejmującej zamierzone działania terrorystyczne.

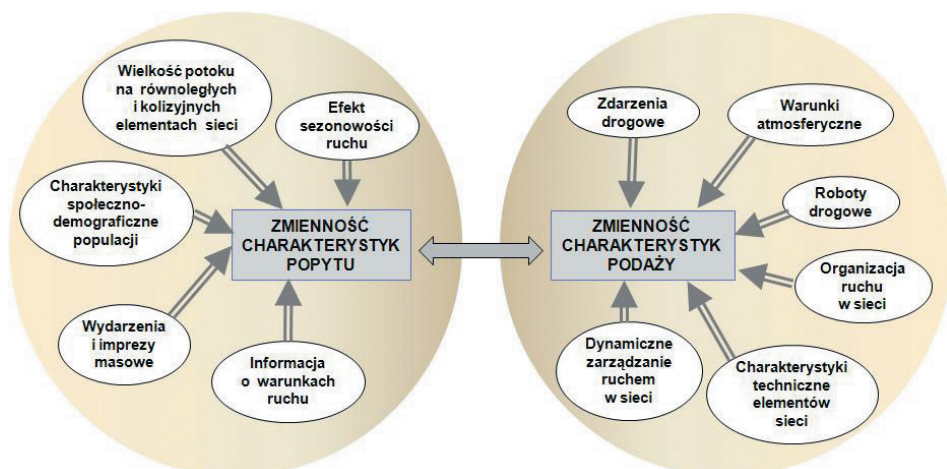
8 Przykładem mogą być roboty w obszarze drogi prowadzone podczas niekorzystnych warunków pogodowych.



Rys. 3. Syntetyczne ujęcie przyczyn zakłóceń w sieci drogowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]

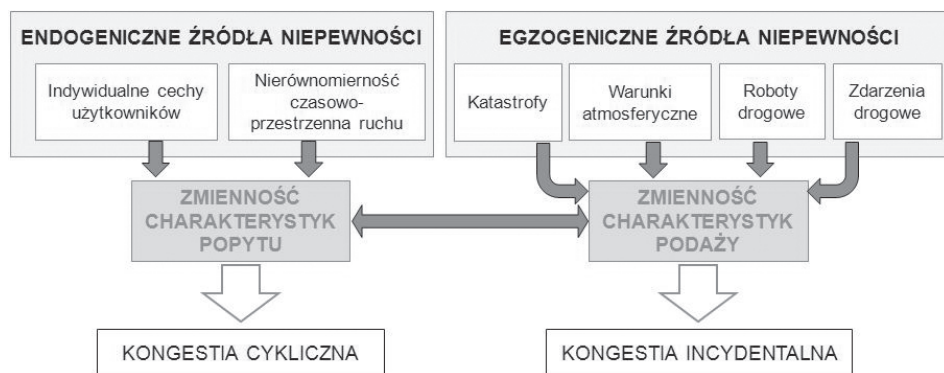
Jeszcze inne ujęcie przyczyn zakłóceń, dla potrzeb analizy niepewności w sieci drogowej i niezawodności czasu podróży, przedstawiono w pracy [44]. Źródła zakłóceń rozpatrywane są zarówno z punktu widzenia wpływu na zmienność charakterystyk popytu, jak i podaży. Dla potrzeb dalszych badań w tym zakresie w pracy [12] dokonano zmian przy określeniu czynników wpływających na zakłócenia, zarówno z punktu widzenia podaży, jak i popytu. Na rysunku 4 przedstawiono schemat uwzględniający wszystkie źródła zakłóceń zamieszczone w obu publikacjach.



Rys. 4. Źródła zakłóceń w sieci drogowej jako źródła niepewności

Źródło: opracowanie własne na podstawie [12, 44]

W pracy [28] dokonano kolejnej modyfikacji takiego podejścia. Czynniki wpływające na zmienność popytu i wywołujące kongestię cykliczną traktowane są jako **endogeniczne źródła niepewności**. Natomiast czynniki związane ze zmiennością podaży, prowadzące najczęściej do ograniczenia zdolności przepustowej różnych elementów sieci transportowej, a w konsekwencji do kongestii incydentalnej, to **egzogeniczne źródła niepewności**. W tym podejściu podkreślono również wzajemne oddziaływanie pomiędzy zmiennością charakterystyk popytu i podaży (rys. 5). Przykładowo, niekorzystne warunki atmosferyczne mogą spowodować ograniczenie przepustowości niektórych elementów sieci, co jednocześnie może wpłynąć na zmianę struktury czasowo-przestrzennej popytu⁹.



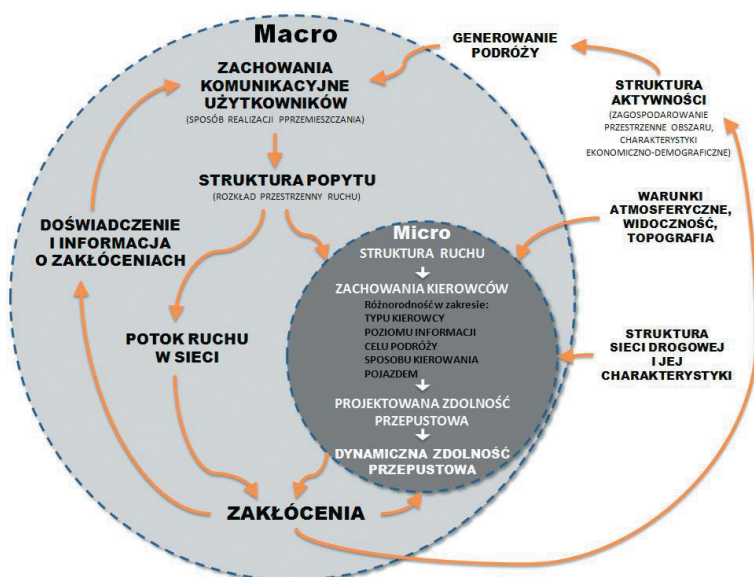
Rys. 5. Źródła zakłóceń w sieci drogowej jako endogeniczne i egzogeniczne źródła niepewności
Źródło: opracowanie własne na podstawie [28]

Szersze ujęcie przyczyn zakłóceń przedstawiono w pracy [31], dzieląc czynniki wpływające na kształtowanie się kongestii na trzy główne grupy:

- **czynniki na poziomie mikroskopowym** – odnoszące się do ruchu na drodze,
- **czynniki na poziomie makroskopowym** – odnoszące się do popytu na korzystanie z dróg,
- **czynniki zewnętrzne** – odnoszące się do struktury aktywności, struktury sieci drogowej i jej charakterystyk oraz czynników losowych (np. warunki atmosferyczne, widoczność), które mogą odegrać ważną rolę w wystąpieniu zatłoczenia.

Na rysunku 6 przedstawiono wzajemne powiązanie tych czynników oraz ich wpływ na zachowanie użytkowników, które z kolei na zasadzie sprzężenia oddziałuje na system transportowy miasta.

⁹ Część podróży może zmienić drogę lub miejsce docelowe, a nawet odłożyć realizację przemieszczania w czasie.



Rys. 6. Czynniki wpływające na zakłócenia ruchu drogowego w ujęciu makro i mikroskopowym

Źródło: opracowanie na podstawie [7, 31]

Na podstawie rysunku 6 można wysnuć następujące wnioski:

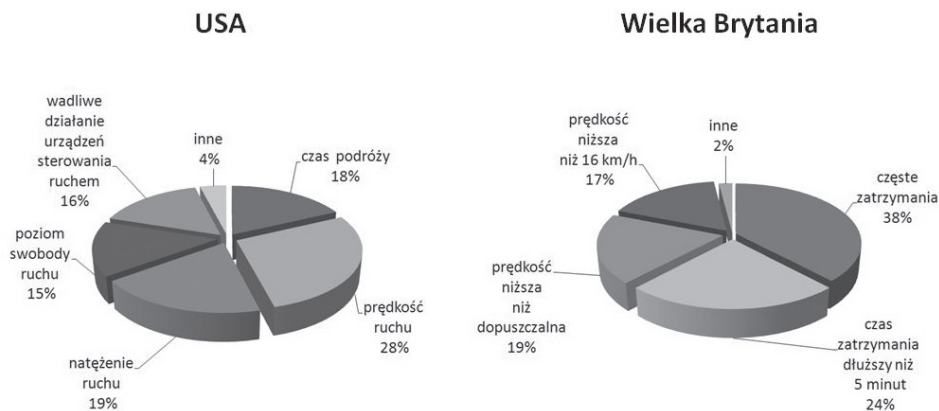
- **struktura aktywności**, kształtowana przez zagospodarowanie przestrzenne obszaru oraz czynniki o charakterze demograficznym, społecznym i ekonomicznym, ma wpływ na zachowania komunikacyjne użytkowników, zarówno gospodarstw domowych, jak i firm,
- **zachowania komunikacyjne** z kolei powodują powstawanie popytu o określonej strukturze i wielkości (poziomie), którego propagacja następuje w czasie i przestrzeni,
- **wielkość i struktura popytu** prowadzi zarówno do ustalenia ogólnego poziomu ruchu w sieci drogowej, jak i występowania specyficznych niejednorodnych potoków pojazdów (i kierowców) na pojedynczych odcinkach sieci drogowej, rozpatrywanych na poziomie mikroskopowym; na tym poziomie dynamiczna zdolność przepustowa jest kształtowana przez szereg oddziaływań (np. różnorodność typów i długości pojazdów, prędkości podróży, struktury wjazdów i wyjazdów, podłączeń pasów, interakcji pomiędzy kolejnymi pojazdami, jak również warunków atmosferycznych i struktury sieci drogowej),
- kiedy wielkość potoku ruchu przekracza **dynamicznie kształtowaną zdolność przepustową** określonego odcinka sieci, pojawia się kongestia a następnie jej propagacja na dalsze fragmenty sieci transportowej,
- **sprężenie zwrotne** następuje, gdy użytkownicy, na podstawie wcześniejszych doświadczeń lub uzyskanej informacji, dostosowują odpowiednio swoje zachowanie do warunków ruchu; w ujęciu długoterminowym kongestia

może prowadzić do zmiany w strukturze aktywności, które z kolei wpływają na zachowania komunikacyjne, strukturę popytu, itd.

Schemat zamieszczony na rysunku 6 uzasadnia potrzebę opracowania strategii wielokryterialnego zarządzania kongestią. Strategie zarządzania ruchem, koncentrujące się na poziomie mikroskopowym, mają ostatecznie ograniczony wpływ, jeżeli strategia zarządzania kongestią nie obejmie również czynników przyczyniających się do jej pojawienia na poziomie makroskopowym i czynników zewnętrznych [31]. Ponadto kongestia powinna być rozpatrywana zarówno z punktu widzenia efektywności sieci i całego systemu transportowego, jak i percepcji jego użytkowników. Odpowiada to opisywanym w wielu publikacjach modelom normatywnym i opisowym ruchu (np. [20, 25, 39]).

Zakłócenie powinno się rozpatrywać w odniesieniu do określonego **stanu bazowego**. W ujęciu dynamicznym można ustalać stan bazowy dla każdego przedziału czasu (przy określonych odchyleniach), a następnie porównywać stan aktualny ze stanem bazowym. Ustalenie tego stanu może odbywać się na poziomie mikro, mezo lub makroskopowym.

Samo określenie stanu bazowego jest istotnym problemem z punktu widzenia oceny rozmiaru zakłóceń oraz kosztów z tym związanych. Według amerykańskiej definicji [4] kongestia pojawia się, kiedy wydajność systemu transportowego nie jest już akceptowalna ze względu na zakłócenia ruchu. Stąd poziom bazowy wprowadzony jest do poziomu **akceptowalnej efektywności systemu**, który zależy od rodzaju obiektu transportowego, lokalizacji geograficznej oraz pory dnia [27]. Ustalenie tego poziomu jest o tyle trudne, że powinno uwzględniać różne wyobrażenia i oczekiwania użytkowników, które mają charakter subiektywny. Na rysunku 7 zaprezentowano wyniki badań, przeprowadzonych za pośrednictwem Internetu wśród specjalistów z dziedziny transportu i w środowiskach akademickich w Stanach Zjednoczonych, na temat **definiowania kongestii** w obszarach metropolitalnych [4]. Dla porównania zamieszczono również wyniki podobnych badań przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii [43].



Rys. 7. Postrzeganie kongestii przez respondentów

Źródło: opracowane na podstawie [4, 43]

Jak pokazano na rysunku 7, zarówno respondenci w USA, jak i Wielkiej Brytanii, wskazywali czas, prędkość, natężenie ruchu, poziom swobody ruchu oraz wady urządzeń sterowania ruchem (rozumiane jako sytuację, w której czas rozładowania kolejki jest dłuższy niż jeden cykl), jako podstawowe zmienne, za pomocą których można zdefiniować kongestię. Jako miary poziomu swobody ruchu podawano m.in. stopień obciążenia, gęstość ruchu, straty czasu oraz liczbę zatrzymań. Większość odpowiedzi zawiera komponent czasowy, co oznacza, że zmienne takie jak: czas podróży, prędkość, wady urządzeń sterowania ruchem oraz poziom swobody ruchu związane są z tym, że użytkownicy doświadczają wydłużenia czasu podróży z powodu kongestii.

Potwierdzono to na konferencji [31], gdzie stwierdzono, że nie istnieje uniwersalna definicja kongestii. Ciągłe przeszkody w dążeniu do spełnienia oczekiwań użytkowników ruchu czyni sformułowanie ilościowej definicji kongestii zadaniem trudnym, jeśli nie niemożliwym. W związku z tym **kongestia powinna być traktowana przede wszystkim jako zjawisko względne, które związane jest z różnicą pomiędzy efektywnością układu drogowego, oczekiwaną przez użytkowników a sposobem, w jaki układ ten funkcjonuje** [31]. W takim ujęciu można ją rozpatrywać w kontekście luki jakościowej pomiędzy jakością oczekiwaną a realizowaną [38]. Oczekiwania użytkowników, dotyczące wydajności systemu drogowego, mają więc kluczowe znaczenie dla zrozumienia sposobu postrzegania kongestii. Te same poziomy swobody ruchu mogą być postrzegane, zarówno jako bardzo uciążliwe czy nieakceptowalne, jak i zadowalające, w zależności od cech użytkowników drogi, takich jak: wiek, doświadczenie w prowadzeniu pojazdu, temperamentu, i innych. Dalsze czynniki mogą zależeć od celu podróży oraz znajomości sieci przez podróżnych.

Oczekiwania użytkowników w odniesieniu do warunków podróży nie są statyczne i charakteryzują się znaczną heterogenicznością, co wpływa na sposób postrzegania kongestii [31]. **Pewien poziom zakłócenia w obszarach miejskich jesteście w stanie zaakceptować.** Potwierdzają to wyniki badań [36], które wskazują, że 26% 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 ruchu¹⁰. W związku z tym Autorzy rozróżniają dwa typy ruchu płynnego: **swobodny**¹¹, charakteryzujący się możliwością wyboru prędkości niezależnym od innych użytkowników ruchu, oraz **wymuszony**, w którym pojazdy przemieszczają się ze stałą, akceptowalną prędkością, jednak jest ona ściśle zdeterminowana aktualnymi warunkami ruchu.

10 W publikacjach amerykańskich do opisu tej sytuacji stosuje się pojęcie **akceptowalnej kongestii** (ang. *acceptable congestion*) [4]. Na tej podstawie można więc rozróżnić akceptowalną i nieakceptowalną kongestię.

11 W dłuższych horyzontach czasu ruch w gęstych sieciach miejskich, w przeciwieństwie do ruchu zamiejscowego, **nie może być traktowany jako swobodny ruch płynny**. Jedynie w krótkich przedziałach czasu w przypadku przemieszczania się pomiędzy węzłami sieci można mówić o chwilowej płynności ruchu.

4. Oddziaływanie zakłóceń na ruch drogowy i modelowanie podróży

Procesy ruchowe, zachodzące w sieci transportowej, są wynikiem odpowiednich **procesów decyzyjnych** użytkowników tej sieci. Zakłócenia w sieci miejskiej wpływają bezpośrednio na procesy ruchowe, kształtując określone warunki ruchu w sieci. Każdy z elementów sieci miejskiej może stanowić miejsce wspólnego funkcjonowania różnych podsystemów transportowych (np. system transportu indywidualnego, zbiorowego, ciężarowego). W związku z tym **efekty zakłóceń** występujących na tym elemencie mogą wpływać negatywnie na sprawne funkcjonowanie każdego z tych podsystemów.

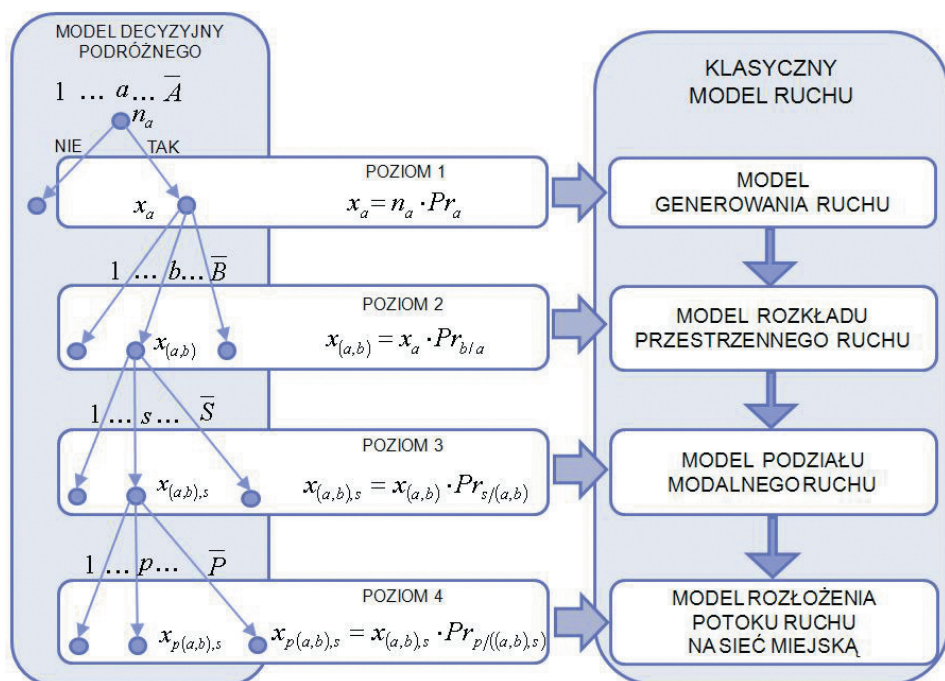
Ponadto pogarszające się warunki ruchu mogą powodować **zmianę zachowań komunikacyjnych**. Zmiana ta może obejmować zarówno wybór innego momentu rozpoczęcia podróży, ograniczenie jej długości lub całkowitą rezygnację z jej realizacji, jak również zmianę środka (podsystemu) transportu czy miejsca docelowego. Ze względu na tzw. czynnik ludzki oddziaływanie zakłóceń na oba procesy (decyzyjny i ruchowy) charakteryzuje się wysokim poziomem niepewności. Można mówić zarówno o bezpośrednim oddziaływaniu zakłóceń na oba procesy, jak i pośrednim (poprzez zakłócenie procesów decyzyjnych - na procesy ruchowe i odwrotnie: poprzez zakłócenie procesów ruchowych – na procesy decyzyjne).

Przy założeniu, że użytkownik sieci miejskiej zachowuje się w sposób racjonalny, proces decyzyjny może mieć **strukturę hierarchiczną**, w której wyróżnia się następujące poziomy [11, 32]:

- poziom 1 – podjęcie przez potencjalnego użytkownika sieci znajdującego się w miejscu początkowym a decyzji o rozpoczęciu przemieszczania w określonym celu (np. praca, nauka, rekreacja, zdrowie, inne) w danym momencie τ lub przedziale czasu t (np. godzina, doba)¹²,
- poziom 2 – podjęcie decyzji o miejscu docelowym podróży b przez osobę, która dokonała określonego wyboru na poziomie 1,
- poziom 3 – podjęcie decyzji o środku transportu s przez podróżnego, który dokonał określonych wyborów na poziomie 1 i 2,
- poziom 4 – podjęcie decyzji o drodze przemieszczania p przez podróżnego, który dokonał określonych wyborów na trzech wcześniejszych poziomach.

Założenia te zostały wykorzystane w klasycznym czterostopniowym modelu stosowanym w planowaniu potoków ruchu w miastach [8, 33]. Na rysunku 8 przedstawiono strukturę hierarchiczną procesu decyzyjnego oraz jego powiązanie z modelem ruchu. Przez n_a oznaczono liczbę wszystkich potencjalnych podróży w miejscu źródłowym a , natomiast przez Pr_a , $Pr_{b/a}$, $Pr_{s/(a,b)}$ oraz $Pr_{p/((a,b),s)}$ - prawdopodobieństwa dokonania określonego wyboru na każdym z czterech poziomów procesu decyzyjnego.

¹² Przesunięcie podróży w czasie traktowane jest jako rezygnacja z jej realizacji w analizowanym przedziale czasu.



Rys.8. Struktura hierarchiczna procesu decyzyjnego odwzorowanego modelem ruchu

Źródło: opracowanie własne

W przypadku zakłóceń ruchu podróżny może zareagować w jeden z następujących sposobów:

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

Jak wcześniej wspomniano, bezpośrednim efektem zakłócenia jest kongestia, która może być rozumiana jako sytuacje prowadzące do uciążliwości wynikających ze wspólnego użytkowania urządzeń lub jednoczesnego zgłaszania potrzeby obsługi [25]. Ze względu na miejsce powstawania można wyodrębnić dwa typy kongestii [9]:

- kongestię na sieci transportowej¹³, w której można wyróżnić:

¹³ Kongestia tego typu nazywana jest również **kongestią ruchową** i określana jako „sytuacje, prowadzące do strat czasu wynikających ze wspólnego użytkowania (...) składnika sieci transportowej przez wiele pojazdów tworzących potok ruchu” [25].

- kongestię na liniach – oddziałującą bezpośrednio na pojazdy (jej skutki są odczuwalne przez właścicieli pojazdów i ładunków, kierowców i pasażerów),
- kongestię w punktach transportowych – oddziałującą bezpośrednio zarówno na pojazdy, jak i ładunki i pasażerów,
- kongestię w środkach transportu – wpływającą bezpośrednio na pasażerów i ładunki¹⁴.

W gęstych sieciach miejskich miejscem powstawania problemów komunikacyjnych są głównie **skrzyżowania**, których przepustowość jest znacznie mniejsza niż przepustowość ciągów komunikacyjnych, na których występują. W efekcie zatłoczenia powstają kolejki pojazdów na wlotach takich skrzyżowań, a kongestia w nich powstająca nazywana jest **kongestią pierwotną**. Stąd zakłócenia przenoszone są na odcinki między skrzyżowaniami i dalej na inne elementy sieci transportowej, prowadząc do zatorów komunikacyjnych¹⁵. Potok ruchu, omijając odcinek krytyczny kieruje się w inne obszary sieci drogowej, powodując tam również przekroczenie przepustowości. Natomiast w otoczeniu „wąskiego gardła” kolejki powstające na wlotach, szczególnie w sieciach gęstych, zaczynają tamować i blokować ruch na odcinkach zbiegających się w tym węźle a następnie w węzłach sąsiednich – w miejscach, które nie są „wąskimi gardłami”, ale na skutek kongestii pierwotnej ulegają zatłoczeniu. W taki sposób powstaje tzw. **kongestia wtórna**.

Według Vickrey’a¹⁶ [45] można wyróżnić następujące formy kongestii:

- **pojedyncza interakcja** (*single interaction*) - zachodzi pomiędzy dwoma pojazdami, przemieszczającymi się na tyle blisko siebie, że aby uniknąć kolizji, prędkość jednego z nich zostaje niekorzystnie zmniejszona, powodując straty czasu,
- **wielokrotne interakcje** (*multiple interaction*) - mają miejsce pomiędzy wieloma pojazdami i zachodzą przy większym zatłoczeniu niż w przypadku pojedynczej interakcji, prowadząc do ogólnego zmniejszenia prędkości i wydłużenia czasu jazdy,
- **bottleneck** („wąskie gardło”) - występuje w miejscu, gdzie przepustowość infrastruktury jest niższa niż na otaczających ją elementach sieci, powodując powstawanie zatorów w punktach lub na odcinkach sieci drogowej,
- **triggerneck** – powstaje, gdy „wąskie gardło” powoduje utrudnienia ruchu na odcinkach sieci przecinających się z fragmentem infrastruktury, na której występuje zator,

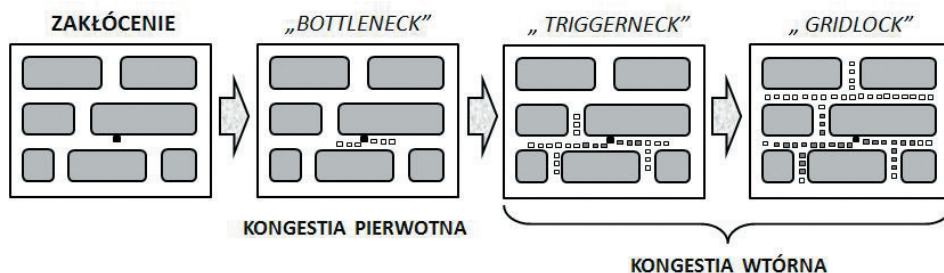
14 Przyczyną tego typu kongestii może być zarówno zatłoczenie występujące w sieci transportowej, jak i niedostosowanie częstotliwości kursowania pojazdów transportu publicznego i/lub ich pojemności do zgłaszanego popytu.

15 Szczególnym przypadkiem kongestii pierwotnej jest tzw. **kongestia węzłowa**, występująca w sytuacji, gdy skutkiem przekroczenia przepustowości skrzyżowania stanowiącego „wąskie gardło” jest zatrzymanie ruchu na wyodrębnionym obszarze przylegającym do tego skrzyżowania. Ten typ kongestii spotyka się często w krajach o wysokim poziomie motoryzacji.

16 William S. Vickrey w roku 1996 został (*wspólnie z Jamesem Mirrlessem*) uhonorowany nagrodą Nobla za *wybitny wkład w rozwój teorii działania w warunkach, gdy zdobycie pełnej informacji o rynku nie jest możliwe. Badania obu naukowców miały fundamentalne znaczenie dla ekonomicznej teorii bodźców w warunkach asymetrii informacji.*

- **powszechne zatłoczenie** (*general density*) - powstaje, gdy zatłoczenie na sieci korzystającej z danej gałęzi transportu (np.: transportu drogowego) zaczyna niekorzystnie oddziaływać na cały system transportowy w mieście, nawet gdy elementy infrastruktury poszczególnych gałęzi są wydzielone,
- **kongestia spowodowana działaniem urządzeń kontroli ruchu** (*network and control*) - specyficzna forma kongestii, spowodowana działaniem urządzeń regulacji ruchu.

Klasyfikacja ta w późniejszych latach została zmodyfikowana w oparciu o obserwację zatłoczenia w miastach i rozprzestrzenianie się zatorów komunikacyjnych. Na tej podstawie wyodrębniono jeszcze jeden typ kongestii określanej jako **gridlock**. Odpowiada on sytuacji, gdy na skutek wcześniejszego zatłoczenia (zwykle typu *bottleneck* lub *triggerneck*) dochodzi do zatrzymania ruchu w całej sieci odpowiadającej określonej gałęzi transportu w określonym obszarze miasta [10]. W związku z tym z punktu widzenia stopnia rozprzestrzeniania się zakłóceń w obrębie jednej gałęzi transportu¹⁷ można wyróżnić trzy zasadnicze poziomy kongestii: **bottleneck**, **triggerneck** oraz **gridlock**, co przedstawiono schematycznie na rysunku 9.



Rys. 9. Ewolucja kongestii w sieci miejskiej

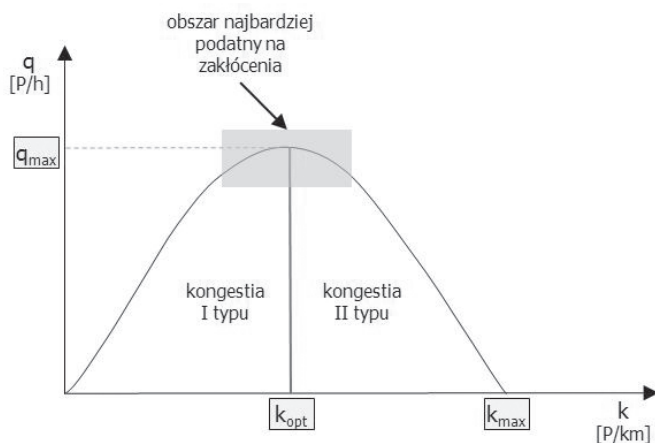
Źródło: opracowanie własne na podstawie [41]

W ujęciu eksploatacyjnym opartym na krzywej zależności intensywności ruchu od jego gęstości można wydzielić dwa zasadnicze typy kongestii (rys. 10). Podstawą tego podejścia jest założenie, że intensywność ruchu jest zależna od prędkości, a każdy odcinek sieci ma ustaloną wartość przepustowości, odpowiadającą maksymalnej intensywności ruchu q_{max} . Wraz ze wzrostem liczby użytkowników drogi, rośnie również gęstość ruchu i równocześnie zwiększa się jego intensywność aż do osiągnięcia wartości maksymalnej q_{max} . Odpowiada to optymalnej wartości gęstości ruchu k_{opt} . **Kongestia I typu** może wystąpić w okresie wzrostu gęstości ruchu aż do osiągnięcia jej wartości optymalnej¹⁸. Dalsze zwiększanie liczby użytkowników

17 Oddziaływanie kongestii może być jeszcze szersze, np. może obejmować również inne gałęzie.

18 W praktyce stan optymalny z punktu widzenia kryterium techniczno-eksploatacyjnego określonego składnika infrastruktury odpowiadający maksymalnej wartości intensywności ruchu trudny jest do osiągnięcia i utrzymania. Wynika to z faktu, że przepustowość może być osiągnięta jedynie przy założeniu, że wszyscy użytkownicy poruszają się z jednakową ściśle ustaloną prędkością zachowując przy tym minimalne odstępstwa między pojazdami oraz braku oddziaływania czynników zewnętrznych (np. warunki atmosferyczne, układ drogowy, wpływ innych użytkowników).

proceedzi do przekroczenia tej wartości, powodując nagle i znaczne zmniejszenie intensywności ruchu i prędkości poruszania się pojazdów. Taki stan odpowiada **kongestii II typu**. Szczytową formą tego procesu jest całkowite zablokowanie danego odcinka drogi (intensywność spada do zera, a czas przejazdu rośnie do nieskończoności)¹⁹.



Rys. 10. Zależność intensywności i gęstości ruchu z zaznaczeniem obszarów możliwego występowania kongestii I i II typu

Źródło: opracowanie na podstawie [2, 9, 19, 25, 41]

Z punktu widzenia płynnego przepływu potoku ruchu kongestia stanowi znaczną uciążliwość. W obszarach miejskich jest to spowodowane powszechnym występowaniem następujących sytuacji [35, 40]:

- zmniejszanie odległości między pojazdami wynikające z mniejszych prędkości, powodujące, że sieć transportowa jest szczególnie podatna na zaburzenia ruchu prowadzące do rozprzestrzeniania się tzw. „fali zaburzeniowej” i tworzenia kongestii wtórnej,
- duża liczba bodźców wizualnych wpływających na zachowanie kierowców (czynniki rozpraszające znajdujące się w zasięgu wzroku kierowcy, teoretycznie ograniczone możliwości przejazdu, wypadki drogowe, niekorzystne warunki pogodowe, nagłe zmiany w przekroju poprzecznym lub podłużnym drogi wymuszające zmianę prędkości),
- zamierzone ograniczenia w przepływie ruchu, wynikające z założeń organizacji i zarządzania ruchem,
- manewry związane ze zmianą pasa i kierunku ruchu.

Każde nieoczekiwane zakłócenie ruchu może wywoływać **nietypowe zachowania komunikacyjne** użytkowników sieci, wynikające z ich dezorientacji i podejmowania często nieracjonalnych decyzji. Zjawiska te mogą powodować zmianę

¹⁹ Stany bardzo silnej kongestii o charakterze przejściowym nazywane są **hiperkongestią** [1]. Przykładem takiej sytuacji mogą być nieplanowane zamknięcia tunelu zlokalizowanego pod rondem im. Gen. Jerzego Ziętka w Katowicach wywołane zdarzeniami losowymi, których bezpośrednim skutkiem są zaburzenia ruchu w całym układzie drogowym śródmieścia Katowic (dochodzące nawet do 3,5 km) [24].

przyjętego wcześniej planu działania [3]. Dla przykładu, w wyniku zbyt dużych strat czasu związanych z postojem w kolejce część kierowców jest skłonna zrezygnować z planowanej pierwotnie drogi przejazdu i wybrać drogę alternatywną. Rezygnacja ta może następować w różnych miejscach, np. w miejscu początku podróży w momencie wyjazdu (gdy kierowca posiada odpowiednią informację), poprzez wyłączenie się z potoku ruchu na jezdni głównej na jednym ze skrzyżowań, przez które przebiega kolejka pojazdów lub też na skrzyżowaniu, przez które aktualnie nie przebiega kolejka pojazdów, ale na wysokości którego kolejka pojazdów jest dobrze widoczna. Dopiero po pewnym czasie adaptacji do nowych warunków ruchu można mówić o nowym stanie równowagi [48].

Z punktu widzenia pojedynczego użytkownika sieci transportowej każde zakłócenie może wywołać odpowiedni **stan emocjonalny**, którego natężenie może być zróżnicowane. Przy znacznej liczbie zakłóceń i przeszkód w sprawnym przemieszczaniu się mogą pojawiać się znaczne trudności w organizacji właściwego sposobu zachowania, a w skrajnych przypadkach może dochodzić do całkowitej dezorganizacji [3].

Rolą transportu nie jest sama realizacja przemieszczenia, ale również spełnienie przy tym określonych warunków, które najogólniej można określić jako [26]:

- 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 w procesie transportowym może spowodować naruszenie tych uwarunkowań, a tym samym spadek poziomu jakości podróżowania. Stąd zasadne wydaje się przyjęcie odpowiedniego **poziomu zakłócenia**, odpowiadającego określonemu poziomowi strat jakości ruchu na skutek zakłócenia, po przekroczeniu którego skutki zakłóceń są odczuwalne. Poziom ten powinien być ściśle związany z warunkami ruchu, co oznacza, że należałoby rozpatrywać zakłócenie płynności ruchu na określonym poziomie. Indywidualni użytkownicy systemu transportowego w różny sposób reagują na zwiększone zatłoczenie na drodze i związane z tym zmniejszenie wiarygodności czasu podróży. W krótkiej perspektywie, można zmienić sposób podróżowania lub moment wyjazdu. W dłuższym horyzoncie czasu, zatory komunikacyjne mogą wpływać na decyzje dotyczące miejsca zamieszkania i pracy. Zakłócenia oddziałują również na sektor gospodarczy, powodując określone skutki nie tylko dla pojedynczych przedsiębiorstw, ale i całego regionu.

Specyficzną grupę zakłóceń stanowią **zjawiska atmosferyczne**. Opady śniegu i deszczu, silne wiatry oraz ekstremalne temperatury wpływają niekorzystnie na zachowania kierowców, funkcjonowanie pojazdów (np. stabilność, zwrotność), częściowe lub całkowite uszkodzenie nawierzchni a nawet zniszczenie całego elementu jezdniowej infrastruktury. Często zjawiska atmosferyczne są przyczyną łań-

cucha zdarzeń prowadzącego do katastrofalnych skutków. Przykładowo silny wiatr poprzez naniesienie dużej ilości śniegu lub gruzu, a nawet powalenie drzew może spowodować zarówno całkowite zablokowanie odcinka drogi, jak i uszkodzenie pojazdu. Zjawiska atmosferyczne prowadzą więc do chwilowego ograniczenia przepustowości układu drogowego, pogarszając w ten sposób warunki ruchowe. Mogą temu towarzyszyć zmiany w sposobie zarządzania ruchem, co powoduje uciążliwość podróży, która w konsekwencji może wywołać zmianę zachowań komunikacyjnych. Badania przeprowadzone w Detroit [16] wykazały, że niekorzystne warunki atmosferyczne stanowiły jeden z głównych czynników w podejmowaniu decyzji o zmianie momentu rozpoczęcia podróży, ale znacznie mniejsze znaczenie miał ten czynnik w przypadku wyboru drogi przemieszczania. Wskazano również, że wrażliwość na informacje o pogodzie jest znacznie większa podczas szczytu porannego niż szczytu popołudniowego.

Warunki atmosferyczne mają również znaczny wpływ na bezpieczeństwo ruchu zarówno w sposób bezpośredni, jak i pośredni. W pracy [5] wskazuje się, że zjawiska pogodowe mogą wpływać w sposób pośredni na bezpieczeństwo ruchu drogowego poprzez m.in. podjęcie decyzji przez użytkownika o realizacji podróży, wybór środka transportu, widoczność drogi i innych użytkowników, kontakt pojazdu z drogą, zmiany behawioralne, np. bardziej ostrożny styl jazdy. Te czynniki mogą z kolei w sposób bezpośredni być przyczyną zdarzenia drogowego.

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule szerokie spektrum problemów, związanych z pojęciami zakłóceń i kongestii w transporcie, wskazuje na potrzebę podejścia systemowego w ich opisie i modelowaniu. Można stwierdzić, że zakłócenia w systemie transportowym występują od samego początku, głównie ze względu na to, że jest to system techniczno-ludzki. Jednak obecnie są one szczególnie dotkliwie odczuwalne przez użytkowników, głównie z powodu koncentracji (gęstości) potoków ruchu oraz dużego natężenia ruchu, osiągającego bardzo często stany nasycenia w elementach sieci transportowej występujących w obszarach zurbanizowanych. Takie stany obciążenia oraz przeciążenia sieci transportowej charakteryzują się minimalnymi wartościami rezerw przepustowości albo ich brakiem. Często rezerwy, które mogłyby skompensować skutki zakłóceń, są „uwięzione w sieci” (np. z powodu ograniczonej dostępności do drogi, wynikającej z jej klasy technicznej – kolejka pojazdów „uwięzionych” na drodze ekspresowej, przebiegającej przez aglomerację o gęstej sieci ulic i dróg miejskich). Bez znaczących i kompleksowych zmian w podziale modalnym, kształtowaniu odpowiednich zachowań komunikacyjnych, organizacji przewozów publicznym transportem zbiorowym, integracji systemów transportowych oraz sterowaniu i zarządzaniu ruchem na obszarze miejskim trudno będzie w istotny sposób złagodzić skutki zakłóceń, które są zarówno przyczyną, jak i skutkiem kongestii. Trudno będzie, nie tyle wyeliminować kon-

gestię, co nią sterować w taki sposób, aby minimalizować wielokryterialnie straty, jakie powoduje.

Literatura

- [1] Arnott R., *The Economic Theory of Urban Traffic Congestion: A Microscopic Research Agenda*. CESifo Venice Summer Institute, Workshop on Environmental Economics and the Economics of Congestion: Coping with Externalities, Venice International University, San Servolo, 2001.
- [2] Ashton W.D., *The Theory of Road Traffic Flow*. Wiley & Sons, New York, 1966.
- [3] Bąk-Gajda D., Bąk J., *Psychologia transportu i bezpieczeństwa ruchu drogowego*. Wydawnictwo Difin SA, Warszawa, 2010.
- [4] 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.
- [5] Bijleveld F., Churchill T., *The influence of weather conditions on road safety*. SWOV Institute for Road Safety Research, The Netherlands, 2009.
- [6] Bohatkiewicz J., Biernacki S., Drach M., Kozłowski D., Nowak P., *Zasady uspokajania ruchu na drogach za pomocą fizycznych środków technicznych*. Biuro Ekspertyz i Projektów Budownictwa Komunikacyjnego „EK-KOM” Sp. z o.o., opracowano na zlecenie Ministerstwa Infrastruktury, umowa nr TRD/1/2008 z dnia 05.02.2008.
- [7] Bovy P., Hoogendoorn S., *Ill-Predictability of Road Traffic Congestion*. [in:] Bell M. and Cassir C. (eds.): *Reliability of Transport Networks*. Research Studies Press, Baldock, United Kingdom, 2000, pp. 43-53.
- [8] Cascetta E., *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. 2nd Edition. Springer Optimization and Its Application, Vol.29. New York, 2009.
- [9] Ciesielski M., *Koszty kongestii transportowej w miastach*. Zeszyty Naukowe – seria II, nr 87, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 1986.
- [10] Ciesielski M., *Ekonomika infrastruktury transportowej*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 1992.
- [11] Chen A., Yang C., Kongsomsaksakul S., Lee M., *Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks*. *Networks and Spatial Economics*, vol. 7, no. 3, 2007, pp.241-256.
- [12] Chen A., Zhou Z., *The α -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times*. *Transportation Research Part B* 44, 2010, pp.493-513.

- [13] Dargay J.M., Goodwin P.B., Traffic Congestion in Europe. Introductory Report England. OECD Report, 1999.
- [14] Gołębska E., Kompendium wiedzy o logistyce. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002.
- [15] 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.
- [16] Hranac R., Sterzin E., Krechmer D., Rakha H., Farzaneh M., Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather. Publication No. FHWA-HOP-07-073, Cambridge Systematics, 2006. Zealand, 20-24 August 2004, pp.180-186.
- [17] Husdal J., The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective. Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (TRB 2005), Washington D.C., USA, 9-13 January 2005.
- [18] Igliński H., Ograniczanie poziomu kongestii transportowej a zrównoważony rozwój miast. Praca doktorska na Wydziale Gospodarki Międzynarodowej Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań, 2009.
- [19] Jacyna M., Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [20] Karoń G., Transport w logistycznym łańcuchu dostaw a zatłoczenie komunikacyjne miast i aglomeracji (w) Kowalska K., Markusik S. (red.): Sprawność i efektywność zarządzania łańcuchem dostaw. Wydawnictwo WSB w Dąbrowie Górniczej, s.101-129, Dąbrowa Górnicza 2011.
- [21] Karoń, R. Janecki, A. Sobota z zespołem, Program inwestycyjny rozwoju trakcji szynowej na lata 2008 2011. Analiza ruchu, Praca NB, Wydział Transportu Politechniki Śl., Katowice 2009.
- [22] Karoń G., Mikulski J., Transportation Systems Modelling as Planning, Organisation and Management for Solutions Created with ITS. In J. Mikulski (Ed.): Modern Transport Telematics, CCIS 239, pp. 277-290, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [23] Krawiec S., Karoń G., Celiński I, Sobota A., Warunki ruchu w sieci drogowej konurbacji górnośląskiej w latach 2007-2008. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria TRANSPORT z. 66. Nr kol. 1825; s.43-56, Gliwice 2010.
- [24] Leszczyński J., Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [25] Letkiewicz A., Gospodarowanie w transporcie samochodowym. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2006.
- [26] Lomax T., Turner S., Shunk G., Quantifying Congestion. NCHRP Report 398, National Academy Press, Washington D.C., 1997.
- [27] Luathep P., Stochastic transport network model and optimization for reliability and vulnerability analysis. PhD Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong, 2011.

- [28] Meyer B., Kongestia w transporcie zbiorowym. *Transport Miejski*, nr 7-8/1997, s.41-42.
- [29] OECD: *Traffic Congestion in Europe*. OECD Report, 1999.
- [30] OECD: *Managing urban traffic congestion*. European Conference of Ministers of Transport Report, OECD Publishing, Paris, 2007.
- [31] Oppenheim N., *Urban travel demand modeling*. Wiley, New York, 1995.
- [32] Ortuzar J., Willumsen L. G., *Modelling transport*. 3rd Edition. Wiley, New York, 2009.
- [33] Pawłowska B., *Zewnętrzne koszty transportu, problemy ekonomicznej wyceny*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2000.
- [34] Report: *Traffic Congestion and Reliability. Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation*. Final Report prepared for FHWA by Cambridge Systematics, Inc. with Texas Transportation Institute, September, 2005.
- [35] 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.
- [36] Sobota A., Karoń G., *Badanie przepustowości skrzyżowań w warunkach tymczasowej organizacji ruchu - Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria TRANSPORT, Gliwice 2012*.
- [37] Starowicz W., *Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2007.
- [38] Steenbrink P., *Optymalizacja sieci transportowych*. WKiŁ, Warszawa 1978.
- [39] Sołtysek J., *Podstawy logistyki miejskiej*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice, 2007.
- [40] Szymczak M., *Logistyka miejska*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 2008.
- [41] Tundys B., *Logistyka miejska – koncepcje, systemy, rozwiązania*. Centrum Doradztwa i Informacji Difin sp. z o.o., Warszawa, 2008.
- [42] UK: *Perceptions of and Attitudes to Congestion*. U.K. Department for Transport, 2002.
- [43] Van Lint J.W.C., van Zuylen H.J., Tu H.J., *Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story*. *Transportation Research Part A* 42, 2008, pp.258-277.
- [44] Vickrey W.S., *Congestion Theory and Transport Investment*. *The American Economic Review*. Vol.59, No.2. Papers and Proceedings of the Eighty-first Annual meeting of the American Economic Association, May 1969, pp.251-260.
- [45] Żochowska R., *Organizacja ruchu w czasie zamknięć drogowych*. Materiały konferencyjne I Konferencji Naukowo-technicznej nt. „Systemy transportowe. Teoria i praktyka”, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.47, Gliwice 2003.

-
- [46] Żochowska R., Optymalizacja zamknięć ulic w złożonych sieciach transportowych. Praca doktorska na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
- [47] Żochowska R., Modelowanie zachowań podróżnych warunkach zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich. VI Międzynarodowa Konferencja „Systemy Logistyczne – teoria i praktyka” w Korytnicy, Logistyka 4/2012.