

Stanisław KRAWIEC¹, Ireneusz CELIŃSKI²

Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Inżynierii Ruchu
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

¹ stanislaw.krawiec@polsl.pl

² ireneusz.celinski@polsl.pl

OCENA WPLYWU ODDZIAŁYWANIA SKRZYŻOWAŃ W UKŁADACH DROGOWYCH

Streszczenie:

W artykule przedstawiono sposób oceny wzajemnego oddziaływania skrzyżowań w układach drogowych. Zaprezentowana procedura umożliwia określanie miar tego oddziaływania oraz ich wartości na podstawie wyników mikrosymulacji ruchu drogowego. Procedura badająca wpływ konfiguracji sieci skrzyżowań wykorzystuje związki ruchu, które można ustalić w układzie drogowym. Wykorzystana jest tu analogia do występujących w innych dziedzinach wiedzy, tzw. współczynników wspólności (ekonomia, biologia, nauki społeczne). Związki ruchu ustalone są na podstawie wyników mikrosymulacji z wykorzystaniem popularnych modeli ruchu. Miary oddziaływania ruchu w układzie drogowym estymowane są na podstawie macierzy związków ruchu. Ocena oddziaływania bazuje na algorytmach analizy przestrzennej. Macierze związków ruchu indeksowane są przy uwzględnieniu występowania w nich obszarów skorelowanych. Identyfikacja związków ruchu ma na celu dostosowanie jego organizacji do istniejących w tym zakresie potrzeb.

Słowa kluczowe: analiza przestrzenna, mikrosymulacja ruchu drogowego, modele ruchu

WPROWADZENIE

Podstawowym przedmiotem działań w sferze optymalizacji systemu transportowego powinno być bilansowanie potrzeb społecznych w zakresie dostępu do infrastruktury drogowej. Dostęp ten rozumiany jest, jako możliwość zrealizowania określonych motywacji komunikacyjnych uczestników ruchu drogowego w wybranym przez nich czasie i miejscu. Obecnie kilka czynników kształtujących zapotrzebowanie na dostęp do infrastruktury drogowej wymaga szczególnego zainteresowania. Czynnikiem tymi są nowe rozwiązania technologiczne (m. in. inteligentne pojazdy i systemy sterowania obszarowego), wzrost wskaźnika motoryzacji, sytuacja mikro i makroekonomiczna, wzrost wskaźnika ruchliwości mieszkańców, relokacja generatorów i absorbentów ruchu w sieci osadniczej.

Dla podmiotów zarządzających infrastrukturą drogową szczególnie ważne są parametry związane ze wzrostem wskaźnika ruchliwości mieszkańców oraz relokacją generatorów i absorbentów ruchu drogowego [2]. Znaczenie wymienionych parametrów jest istotne w przypadku modernizacji i rozbudowy systemów sterowania ruchem drogowym oraz zmian w jego organizacji. Niestety, zazwyczaj działania w tej sferze, zamiast wyprzedzać te zmiany – podejmowane są, jako efekt zaistniałych w ich wyniku perturbacji w ruchu drogowym. Postępowanie takie jest wysoce nieefektywne.

W realiach polskich wskaźnik ruchliwości mieszkańców wyrażony średnią liczbą podróży wykonywaną przez jednego mieszkańca obszaru w ciągu doby nieustannie rośnie [2]. Aktualnie wskaźnik ten jest wciąż blisko dwukrotnie mniejszy niż w krajach europejskiej czołówki gospodarczej [6,7,8,9]. Zmiany wskaźnika ruchliwości dotyczą głównie osób poruszających się w komunikacji indywidualnej. Znajomość tendencji w zakresie ruchliwości

ma kapitalne znaczenie dla organizacji oraz sterowania ruchem drogowym. Związane jest to z wciąż rosnącym udziałem komunikacji indywidualnej w ruchu. Zgodnie z prognozami w najbliższych latach będzie to dominująca forma przemieszczania się ludności [6,7,8]. Idea rozwoju zrównoważonego transportu wraz z podejmowanymi w tym kierunku działaniami prawdopodobnie nie jest w stanie odwrócić dotychczasowych tendencji w zakresie podziału modalnego.

W artykule zaproponowano metodę mającą na celu łatwiejsze dostosowywanie infrastruktury drogowej do zmian zapotrzebowania społecznego w horyzoncie średnio- i długookresowym. W metodzie proponuje się analizę dynamiki zmian oddziaływania skrzyżowań w układach komunikacyjnych miast. Temat ten był poruszany w pewnym aspekcie min. w monografii [13], gdzie rozpatrywano ocenę efektywności sieci w kontekście wpływu konfiguracji sieci skrzyżowań. Według proponowanej metody obserwacja zmian oddziaływania skrzyżowań w układach drogowych pozwala na lepsze dostosowanie organizacji ruchu do bieżących potrzeb w tym zakresie.

W proponowanej metodzie dla celów oceny oddziaływania skrzyżowań w układach drogowych można wykorzystać znane i rozwijane od ponad trzech dekad modele analizy przestrzennej (ang. spatial analysis). Metody te wykorzystane w przedmiotowym zagadnieniu bazować będą na danych wejściowych otrzymywanych na podstawie wyników modeli mikrosymulacji ruchu drogowego: jazdy za liderem (CFM) i zmiany pasa ruchu (LCM). Modele mikrosymulacji ruchu wykorzystywane zostają w celu zbierania danych odnośnie związków ruchu pomiędzy skrzyżowaniami analizowanego układu drogowego. Związki ruchu były już opisywane w literaturze przedmiotu w aspekcie optymalizacji i koordynacji zamknięć drogowych [5]. Termin „związki ruchu” powstał przez analogię do występujących w innych dziedzinach wiedzy współczynników wspólności (ang. commonality factors) [20]. Zastosowanie kombinacji modeli mikrosymulacji ruchu i analizy przestrzennej umożliwi organizatorom i zarządcom reagowanie na zmiany w zachowaniach komunikacyjnych mieszkańców. Planowanym efektem działania proponowanej metody będą decyzje w zakresie zmian form organizacji ruchu oraz parametrów sterowania sygnalizacją świetlną.

1. MIARY ODDZIAŁYWANIA MIĘDZY SKRZYŻOWANIAMI

Każdy użytkownik układu komunikacyjnego w gęstych sieciach drogowych ma na co dzień do czynienia z oddziaływaniem sąsiednich skrzyżowań. Sytuacja taka powstaje m. in. w przypadku braku możliwości przejechania skrzyżowania z sygnalizacją świetlną mimo wyświetlanego sygnału zielonego dla potoku ruchu. Propagacja zaburzeń w układach drogowych w ujęciu probabilistycznym jest przedmiotem szerokiej dyskusji w literaturze przedmiotu [12]. Także samo oddziaływanie skrzyżowań drogowych pomiędzy sobą jest incydentalnie omawiane w literaturze przedmiotu [10,11,12,13]. W celu określenia tych oddziaływań niezbędne jest zdefiniowanie miar tego zjawiska. Do określenia tych miar istotne jest określenie odległości oddziaływania (mierzonej wzdłuż ciągu komunikacyjnego) np. pomiędzy skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną i bez sygnalizacji świetlnej, które są znane na podstawie przeprowadzonych badań empirycznych [13]. W literaturze określa się, że skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną oddziałuje na sąsiednie obiekty w układzie drogowym w odległości do kilkuset metrów od czoła sygnalizatora [13]. Odległości pomiędzy skrzyżowaniami i inne elementy poszczególnych miar należy dla celów określonych w artykule identyfikować i agregować.

Dla potrzeb identyfikacji miar oddziaływania układ drogowy w gęstej sieci transportowej złożony z n skrzyżowań można opisać macierzą kwadratową A o wymiarach $n \times n$ gdzie każdy

element a_{ij} opisuje oddziaływanie pomiędzy i-tym i j-tym skrzyżowaniem. Element macierzy A można zdefiniować różnorodnie, dla różnych rzędów agregacji ruchu w układzie drogowym, niemniej jednak podstawowym poziomem, dla którego określane są oddziaływania w układzie ruchu drogowego są interakcje pomiędzy pojazdami. Macierze oddziaływania można tworzyć dla pojedynczych pojazdów, potoków ruchu, skrzyżowań drogowych etc. Skrzyżowanie może być dla przykładu opisane wartością potencjału generującego lub absorbującego ruch – obliczanego, jako suma potoków ruchu obciążających je w określonym interwale czasu. Inne formy agregacji mogą dotyczyć węzłów oraz zbiorów węzłów i skrzyżowań. Rozpatrywanie oddziaływania pojedynczych pojazdów przy braku możliwości technicznych sterowania każdym z nich niezależnie - jest w tej chwili nieuzasadnione - choć możliwe w przyszłości. Istotnym dla potrzeb metody jest badanie oddziaływania w odniesieniu do potoków ruchu. Agregacja oddziaływania z poziomu potoku ruchu na skrzyżowanie bądź węzeł zasadniczo nie zmienia stosowanej metodyki. Różnica jest w użyteczności danego poziomu agregacji. Analiza w oparciu o związki ruchu pomiędzy potokami umożliwić powinna optymalizację ruchu poprzez zmiany parametrów sterowania. Agregacja ruchu na poziomie skrzyżowań i węzłów drogowych powinna umożliwić optymalizację w ujęciu -średnio i długoterminowym [4].

W przypadku stosowania mikrosymulacji dla celów ustalania wartości miar oddziaływania, związki ruchu w układzie drogowym określane są na podstawie danych odczytanych z metryk (rejestrów) pojazdów. Podstawowym sposobem określenia związków ruchu pomiędzy dwoma skrzyżowaniami, potokami etc. jest wyznaczenie procentu tzw. ruchu wspólnego. Można również określić stopień obciążenia generowanego przez określony element układu ruchu drogowego na sąsiedni element w sieci. Wskaźnik ten może być określony np. ilorazem natężenia potoku ruchu dopływającego ze skrzyżowania j-tego do sumy natężeń wszystkich potoków ruchu w węzle i-tym (w ujęciu dynamicznym-intensywnością). Przykładowa wartość $a_{ij} = 0.2$ oznacza, że w skrzyżowaniu i-tym 20% wolumenu potoków ruchu stanowią pojazdy poruszające się z węzła j-tego. Wskaźnik ten może ponadto być prognozowany jako prawdopodobieństwem obciążenia skrzyżowania i-tego pojazdem z węzła j-tego. W przekroju układu drogowego wskaźnikiem takim może być określenie oddziaływania jako procentu wspólnego potoku w ruchu ogółem. Wartości macierzy związków ruchu zmieniają się dynamicznie – wraz z upływem czasu. Wartości tej macierzy aktualizuje każdy pojazd zmieniającym położenie w rozpatrywanej sieci dróg i skrzyżowań, w związku z czym macierz A nie jest macierzą symetryczną. Rozszerzając macierz oddziaływania w układzie ruchu drogowego o kolejny wymiar, można zdefiniować związki ruchu pomiędzy potokiem ruchu i-tym i j-tym, traktowanymi łącznie, w każdym kolejnym węzle (skrzyżowaniu). Umożliwia to analizę propagacji zakłóceń dwóch różnych, kolizyjnych potoków ruchu w poszczególnych węzłach sieci transportowej. Ekstrapolując to postępowanie można tworzyć wielowymiarowe związki ruchu. W ten sposób definiuje się macierz trójwymiarową A' o wymiarach $n \times n \times n$ gdzie każdy element a'_{ijk} określa związek pomiędzy sumarycznym wolumenem potoków ruchu z węzła i-tego i j-tego w węzle k-tym. Miara oddziaływania pomiędzy dowolnym i-tym oraz j-tym potokiem ruchu będzie przyjmowała wartość z zakresu od 0 do 1. Uwzględnia to stochastyczny charakter rozkładu potoków ruchu w układzie drogowym.

Retrospekcję oddziaływania w układzie ruchu drogowego z dokładnością do trajektorii pojedynczego pojazdu umożliwiają wyłącznie modele mikrosymulacji. Modele te oparte są głównie na szeroko rozpowszechnionych w literaturze przedmiotu modelach jazdy za liderem i zmiany pasa ruchu. W mikrosymulacji ruchu drogowego każdy pojazd generowany w układzie drogowym posiada indywidualną metrykę (zwaną również rejestrem). Jest to wektor lub macierz złożony(a) z parametrów opisujących przebieg oraz charakterystyki ruchu

pojazdu w analizowanej sieci od źródła podróży do jej ujścia. Retrospekcja metryki pojazdu poruszającego się w modelowanym układzie drogowym umożliwia tworzenie różnorodnych związków ruchu. Można wstecz odtworzyć zależności pomiędzy poszczególnymi skrzyżowaniami, potokami itd. w układzie drogowym. Analiza metryki indywidualnych pojazdów umożliwia odtworzenie potoków ruchu pomiędzy poszczególnymi węzłami. Innymi słowy mikrosymulacja pozwala opisać w jaki sposób poszczególne skrzyżowania drogowe wpływają na wolumen ruchu w pozostałych obszarach układu drogowego. Powala to określać również straty czasu w poszczególnych węzłach w zależności od pochodzenia kolizyjnych potoków ruchu (ich ścieżki w sieci). Analiza zapisu historii metryki pozwala na odtworzenie zakłóceń ruchu w każdym elemencie macierzy związków ruchu, również na jej przekątnej. Przedstawione macierze A i A' mogą być obliczane w horyzoncie średnio- i długoterminowym. Możliwe jest określenie związków ruchu w interwale pomiarowym $\Delta t \gg 0$. Taki horyzont określania związków ruchu w sieci umożliwia prezentowana w artykule metoda. W gęstych sieciach drogowych przy istotnym zmniejszeniu wartości interwału Δt możliwe będzie implementowanie proponowanej metody w algorytmach sterowania ruchem. Przykładowo zakładając, że w gęstych sieciach transportowych średnie odległości między skrzyżowaniami oscylują w zakresie rzędu 50-150 metrów, średnia prędkość pojazdów waha się w granicach ok. 20-40 km/h - można ustalić minimalny interwał w jakim możliwe jest określenie zmian wartości miar oddziaływania. Dla wymienionych wyżej danych - interwał ten wynosiłby ok. 12 sekund. Zakładając „a priori” powyższe założenia, w czasie średnio 12 sekund każdy sąsiedni węzeł drogowy zostanie obciążony poprzez pojazd z węzła przylegającego – zmieniając w ten sposób wartości macierzy związków ruchu a w konsekwencji miary oddziaływania. Niezależnie od wartości tego interwału elementy macierzy związków ruchu zmieniają się dynamicznie w każdej sekundzie funkcjonowania układu drogowego. Interwał w którym można ustalać zmiany miar oddziaływania zależy od struktury układu drogowego, średnich prędkości poruszających się w nim pojazdów oraz rodzaju sterowania ruchem. Oznacza to z kolei, że przy prawidłowej implementacji metody można ją wykorzystać dla celów sterowania ruchem z dokładnością do długości pojedynczego cyklu sterowania sygnalizacją świetlną (średnio 40-50 sekund).

Związki ruchu, analizowane w pewnym horyzoncie czasu w układzie drogowym można określić jako sekwencję estymacji wartości elementów macierzy $A_1 \rightarrow A_2 \dots \rightarrow A_i \dots \rightarrow A_n$. Wartości macierzy a_{ij} oscylują w zakresie od 0 do 1 z okresem Δt (okres pomiaru charakterystyk symulacji). Zero oznacza brak oddziaływania pomiędzy dwoma skrzyżowaniami (encjami układu drogowego) - wartość jeden oznacza maksymalne możliwe oddziaływanie pomiędzy takimi elementami (maksymalna możliwa współzależność lub zależność). Macierze związków ruchu tworzone na bazie udziału wolumenu ruchu z węzła j-tego w węźle i-tym (podstawowe) można uogólnić na pozostałe charakterystyki ruchu: straty czasu - D, płynność ruchu - F, prędkości - V, kolejki pozostające - L etc. Zaawansowane macierze związków ruchu można tworzyć na bazie charakterystyk uzyskanych w trakcie mikrosymulacji. W odróżnieniu od podstawowych związków ruchu, które uwzględniają wyłącznie wolumen natężenia pojazdów pozostałe z nich mogą i powinny uwzględniać złożone procesy w ruchu drogowym. W tym znaczeniu w macierzach związków ruchu na pozycji elementu a_{ij} można ujmować wyłącznie te pojazdy z węzła j-tego które zakłócają ruch w węźle i-tym. Z kolei na pozycjach macierzy A' te pojazdy z obydwu potoków ruchu i-tego i j-tego które wzajemnie się zakłócają w węźle k-tym. Podejście takie umożliwia tworzenie macierzy związków ruchu które uwzględniają zależności wpływające na straty czasu, długości kolejek pozostających etc. Pozwala to na dokładniejsze analizy ruchu w układzie drogowym, również pod kątem jego sterowania w aspekcie zmian parametrów pracy sygnalizacji świetlnej.

Macierze związków ruchu można określić zarówno dla jednorodnego potoku ruchu jak również dla poszczególnych typów pojazdów (zmienna struktura rodzajowa). Mikrosymulacja ruchu umożliwia tworzenie związków ruchu w rozbiciu nie tylko na poszczególne typy, ale również na określone w wybrany sposób klasy pojazdów. Podejście to umożliwia włączenie w zakres analiz interakcji potoków ruchu kołowego z ruchem pieszych oraz innymi środkami transportu występującymi w komunikacji w danym układzie drogowym. W związku z powyższym wynikiem analizy ruchu w układzie drogowym stanowiącym przedmiot analizy może więc być zbiór macierzy A , A' , D , F , V i Q (związek wolumenów natężeń ruchu, strat czasu, płynności ruchu, prędkości, kolejek pozostających itp.). Dynamika zmian tych macierzy może być wykorzystana w logistyce miejskiej obejmującej systemy logistyczne terenów zurbanizowanych. Logistyka miejska organizuje działalności operatorów funkcjonujących na obszarach wysoko zurbanizowanych w celu obniżenia globalnych kosztów [14]. Macierze związków ruchu mogą stanowić kryterium optymalizacji przewozów i dostaw. Jest to znacznie bardziej zaawansowane podejście do analizy łańcuchów dostaw niż dotychczas stosowane.

2. KONCEPCJA MODELU ODDZIAŁYWANIA

Wykorzystanie modeli mikrosymulacji ruchu drogowego umożliwia uzyskanie macierzy związków ruchu w pożądanej formie. Związki te ujmują korelacje pomiędzy potokami bądź elementami układu drogowego w określonym interwale pomiaru (okresie symulacji komputerowej). Związki te są obecnie praktycznie niemożliwe do oszacowania na gruncie badań empirycznych. Interwał czasu pomiaru/obserwacji zależy od odległości pomiędzy węzłami sieci oraz średniej prędkości pojazdów. Odległości powinny być definiowane na długości od czoła sygnalizatorów lub linii warunkowego i bezwarunkowego zatrzymania w pierwszym elemencie oddziaływania do analogicznego miejsca w elemencie drugim, ewentualnie do miejsca w którym to oddziaływanie ustaje w elemencie drugim lub jest modyfikowane. Wtórą kwestią jest tu wybór, czy analiza związków ruchu prowadzona będzie pod kątem potoków ruchu czy może elementów infrastruktury technicznej układu drogowego. O wyborze przedmiotu analizy decydować powinno przeznaczenie obliczanych związków ruchu. Jak już wspomniano wcześniej, związki ruchu w układzie drogowym można definiować na podstawie klasycznych miar, takich jak: natężenia ruchu, straty czasu, płynność ruchu, prędkości, kolejki pozostające etc. Uzyskane macierze związków ruchu są podstawą dla analizy układu drogowego pod kątem oddziaływania poszczególnych potoków bądź jego elementów na siebie. Model oddziaływania może uwzględniać zarówno poszczególne macierze związków ruchu traktowane oddzielnie/niezależnie jak również mogą być one agregowane do jednej wypadkowej struktury. Poszukiwanie właściwej macierzy związków ruchu uwzględniać musi związki ruchu odnoszące się do różnych procesów i charakterystyk ruchu drogowego zebrane w jednej strukturze danych poszukiwanego modelu. Podejście to wymaga jednak ustalenia wag dla odpowiednich macierzy związków ruchu. Wagi dla poszczególnych macierzy związków ruchu, sposób ich ustalania zależą powinien od celu i sposobu optymalizacji ruchu. Proponowany model oddziaływania w układzie ruchu drogowego można zatem zapisać jako średnią ważoną poszczególnych macierzy związków ruchu. Każdy element tej macierzy F_{ij} należy obliczyć zgodnie z wyrażeniem (1).

$$F_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (F_{ij}^k w_k)}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (1)$$

gdzie: F_{ij} – element macierzy związków ruchu określających oddziaływanie potoku ruchu ze skrzyżowania j-tego na węzeł i-ty,

w_k – waga składowej modelu,

k – k'ta macierz związków ruchu wyrażona określonymi miarami np.: natężenia, straty czasu, prędkości itp.

Niezależnie od zaproponowanego wyżej podejścia, które wymagało będzie określenia odpowiednich wag dla macierzy związków ruchu można wykonywać analizy na poszczególnych macierzach w zależności od przedmiotu optymalizacji ruchu. Waga odpowiedniej macierzy związków ruchu zależy więc od kryterium optymalizacji.

Mając do dyspozycji macierze A, A', \dots, F można do dalszej analizy zastosować metody analizy przestrzennej (ang. spatial analysis). Bazują one na korelacji zmiennych charakteryzujących określone segmenty analizowanej przestrzeni. W omawianym przypadku badana może być korelacja zmiennych charakteryzujących potoki ruchu pomiędzy skrzyżowaniami (wpływ potoków ruchu na skrzyżowania sąsiednie). W analizie przestrzennej metody te służą do badania podobieństwa obszarów geograficznie przyległych. W odniesieniu do optymalizacji systemów transportowych badane może być oddziaływanie skrzyżowań zlokalizowanych w jednym układzie drogowym. Korelacja przestrzenna występuje wtedy, gdy dwa skrzyżowania zlokalizowane są w takiej odległości komunikacyjnej, że pojazdy poruszające się pomiędzy nimi w istotny sposób wpływają na jakość ruchu w obu lub na jednym z nich. Jest to korelacja znana wszystkim użytkownikom dróg „a posteriori”. Innymi słowy, proponowana metoda może pomóc w odpowiedzi na pytania, jak organizacja ruchu bądź zlokalizowane systemy sterowania na danym skrzyżowaniu wpływają na efektywność działania sąsiednich obiektów tego typu. Wykorzystane w tym celu mogą być metody autokorelacji przestrzennej. Narzędziem wykorzystywanym w tym celu może być np. statystyka I Morana (tzw. model przestrzenny). Celem stosowania statystyki I Morana jest określenie siły oraz charakteru autokorelacji przestrzennej wskaźników zależności. W przypadku analizy przestrzennej danych geograficznych czy ekonometrycznych wymaga to podania wag przestrzennych reprezentujących relacje geograficzne zapisane za pomocą macierzy lub grafu [19]. W przypadku rozpatrywanej metody oceny oddziaływania pomiędzy skrzyżowaniami układu drogowego wspomnianymi wagami są macierze związków ruchu: natężeń, strat czasu etc. W przypadku klasycznych zagadnień analizy przestrzennej wagi przestrzenne mogą być określane jako związki styczności, miary odległości, miary ekonomiczne, społeczne bądź jakiegokolwiek inne charakterystyki jednoznacznie opisujące przedmiot analizy etc. W przypadku zagadnień związanych z wykorzystaniem analizy przestrzennej w proponowanej metodzie będą to macierze związków ruchu. Statystykę I Morana [15] w takim przypadku można przedstawić następująco (wyrażenie 2):

$$I = \frac{n}{W} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (F_i - \bar{F})(F_j - \bar{F})}{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (2)$$

gdzie:

w_{ij} - waga połączenia skrzyżowania i-tego z j-tym,

W - macierz wag, suma elementów w_{ij} ,

F_i, F_j - wartość zmiennych w jednostkach przestrzennych i oraz j (macierze związków ruchu), potencjały skrzyżowań drogowych, poziomy natężenia ruchu etc,

\bar{F} - średnia we wszystkich jednostkach przestrzennych, kryterium standaryzacji macierzy.

Statystyka I Morana przyjmuje wartości z zakresu od -1 do 1. Wartość 0 oznacza brak autokorelacji sąsiednich skrzyżowań (silnego związku między ruchem - przyczyny i skutku),

wartości ujemne oznaczają ujemną autokorelację - natomiast dodatnie silną zależność. Ujemna autokorelacja oznacza oddziaływanie zróżnicowane, dla którego poszczególne skrzyżowania nie wpływają na siebie w istotnym stopniu. Są to inaczej mówiąc skrzyżowania o słabych lub zróżnicowanych związkach ruchu. Wzrost natężenia ruchu lub strat czasu w jednym z nich nie jest powiązany z identycznymi charakterystykami w węźle sąsiednim. Tym niemniej jednak w takich przypadkach silna ujemna autokorelacja powinna być szczegółowo wyjaśniona. Dodatnia autokorelacja oznacza występowanie w analizowanym układzie drogowym tzw. wspólnych klastrów- obszarów skupiających kilka sąsiednich skrzyżowań - charakteryzujących się silną autokorelacją. Dzieje się tak w rejonach występowaniem stałych, silnych i jednorodnych związków ruchu na większym obszarze układu drogowego. Sytuacja taka ma miejsce, gdy wzrostowi natężeń ruchu lub strat czasu w jednym z węzłów towarzyszą analogiczne procesy w węźle (skrzyżowaniu) sąsiednim. Stopień autokorelacji wynikający ze statystyki I Morana określany jest na podstawie uprzedniej standaryzacji macierzy związków ruchu względem wartości średniej. Można dzięki temu regulować podatność metody na przypadkowe odchylenia w ruchu drogowym.

Wykorzystanie statystyki I Morana umożliwia fakt, że układ ruchu drogowego jest w pierwszym rzędzie, a może przede wszystkim, pewnym układem przestrzennym, który dopiero w dalszej kolejności określany jest przez jego organizację ruchu oraz sposób sterowania, Natężenia ruchu wpływają na organizację ruchu i parametry sterowania w sposób zasadniczy - tym niemniej wtórny wynikający z jego struktury. W pracy [13] określone to zostało jako konfiguracja sieci skrzyżowań. Zatem podstawowe związki w układzie ruchu drogowego ustala jego struktura. Jako układ przestrzenny, system infrastruktury transportu drogowego podlegać może ocenom z wykorzystaniem metod analizy przestrzennej. Zastosowanie tej metody pozwoli wykryć zasadnicze zależności w układzie drogowym, które mogą być uszczegółowione za pomocą dalszych analiz.

Analiza układu ruchu drogowego na bazie macierzy związków ruchu z wykorzystaniem metod analizy przestrzennej może umożliwiać dobór odpowiedniej struktury i organizacji ruchu. Obszary skrzyżowań drogowych spójne pod względem oddziaływania mogą zostać sklasyfikowane pod kątem realizacji sterowania w ramach systemów obszarowych. Obszary charakteryzujące się ujemną autokorelacją mogą być rozpatrywane jako izolowane w zakresie sposobu sterowania ruchem realizowanym w ich obrębie. Ujemna autokorelacja jest również informacją w kierunku sposobu optymalizacji systemów sterowania obszarowego. Wartość współczynnika autokorelacji statystyki I Morana może być ponadto kryterium stosowności konkretnych rozwiązań technicznych w zakresie sterowania ruchem. Podobnie wartości współczynnika autokorelacji mogą być kryterium wykorzystanym dla celów organizacji ruchu w tym również w zakresie planowania tras i rozkładów jazdy transportu publicznego.

W formie przedstawionej równaniem (2) statystyka I Morana nie oddaje zależności odległości komunikacyjnej poszczególnych elementów układu drogowego od siebie. W celu uwzględnienia innych złożonych zależności charakteryzujących ruch drogowy można zaimplementować metodę znaną z analiz ekonometrii przestrzennej. Jest to metoda potencjału znana również pod nazwą: grawitacyjna (wyrażenie 3). Metoda potencjału określającego oddziaływanie dla skrzyżowania (wpływ potencjału skrzyżowania) może być zgodnie z tym założeniem zapisana jako (miara „przyciągania” dwóch skrzyżowań- analogia do siły grawitacji dwóch ciał):

$$P_{ij} = C_{ij} \frac{F_i(\sum q_m^{(ij)}) F_j(\sum q_m^{(ij)})}{\sum F_j \sum (q_m^{(ij)})} D_{ij} \quad (3)$$

gdzie:

$F_i(\sum q_m^{(ij)})$ - potencjał i-tego obszaru, obiektu, skrzyżowania, potoku ruchu w tym

- wypadku miara związku ruchu,
- C_{ij} - funkcja oporu przestrzeni uwzględniająca spadek liczby podróży wraz ze wzrostem odległości przemieszczenia,
- D_{ij} - stała/łe modelu.

Proponowana koncepcja metody wskazywania miar oddziaływania ruchu oraz określania ich wartości w przyszłości może posłużyć dla celów sterowania ruchem drogowym. W przypadku spadku wartości jakichkolwiek elementów rozpatrywanych macierzy, powstają rezerwy ruchu w słabo obciążonych elementach układu ruchu drogowego. Rezerwy te mogą być przekazywane do innych elementów układu drogowego w ramach sterowania obszarowego. Przekazywanie to może następować poprzez zmianę stanów sygnalizacji świetlnej na sygnalizatorach. Transfer rezerw przepustowości następował będzie ze skrzyżowań, których autokorelacja z układem będzie malała do tych, w których autokorelacja będzie rosła. Umożliwia to inteligentne łączenie fragmentów obszarów układu drogowego w zależności od aktualnych potrzeb reprezentowanych za pomocą macierzy związków ruchu a estymowanych np. z pomocą prezentowanej koncepcji. Istniejące obecnie systemy sterowania obszarowego mają co prawda zabudowaną podobną logikę (tzw. marriage&divorce), niemniej jednak potrzebny jest rozwój omawianej w artykule metody. Istniejące rozwiązania np. w systemach SCOOT i SCATS nie są w stanie odwzorować związków ruchu na poziomie szczegółowości możliwej do zrealizowania w proponowanej metodzie.

PODSUMOWANIE

Rozwój proponowanej w artykule metody umożliwia stworzenie elastycznego narzędzia dla celów wspomagania optymalizacji układów ruchu drogowego. Narzędzie takie może być stosowane zwłaszcza wszędzie tam, gdzie struktura układu drogowego nie jest jednorodna. Dobrym przykładem mogą być systemy obszarowego sterowania ruchem, gdzie oddziaływanie ruchu pomiędzy nimi a ich otoczeniem rzadko jest przedmiotem szczegółowych analiz. W dalszej perspektywie narzędzie to umożliwia tworzenie inteligentnych systemów sterowania obszarowego o zdecentralizowanej logice zmieniającej struktury decyzyjne z zależności nie tylko od zmian wolumenu ruchu, lecz również od fluktuacji wartości macierzy pozostałych związków ruchu. W aspekcie panujących w ruchu drogowym tendencji, zwłaszcza przemieszczaniu się wąskich gardeł w czasie, wydaje się, że jest to rozwiązanie adekwatne do skali powstających obecnie problemów.

Zasadniczym problemem jest w tym wypadku określenie horyzontu zmian kwantyfikowania związków ruchu. Same macierze związków ruchu są strukturami dynamicznymi – których wartości zmieniają się stochastycznie w czasie. W gęstych sieciach transportowych jakich z reguły dotyczy problem optymalizacji ruchu - zmiany te będą w przyszłości pozwalały na stosowanie prezentowanej metody dla ustalenia oddziaływania między ruchem wewnątrz i poza strefą sterowania obszarowego. Opracowywanym obecnie horyzontem analizy są możliwości określania zmian oddziaływania w horyzontach -średnio i długokresowym.

W perspektywie dalszego rozwoju prezentowanej metody z uwagi na stochastyczny charakter związków ruchu dla celów ich analizy stosowane mogą być elementy teorii zbiorów rozmytych, granularyzacja informacji etc.

LITERATURA

- [1] Sandler W. M.: Driving Around the USA: Automobiles in American Life, Oxford University Press, 2003, p.21
- [2] 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.
- [3] Krawiec S., Celiński I.: Sterowanie obszarowe - przykłady rozwiązań w aspekcie modelowania ruchu drogowego w miastach Międzynarodowa Konferencja Transport XXI w, Logistyka, Białowieża 2010
- [4] Krawiec S., Celiński I.: Sterowanie obszarowe - przykłady rozwiązań w aspekcie modelowania ruchu drogowego w miastach, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z.73. Warszawa 2010.
- [5] Żochowska R.: Wyznaczanie macierzy związków ruchowych w gęstych sieciach transportowych. Zeszyty Naukowe PŚ. Zeszyt 44. Nr kol. 1562. Gliwice 2002. r.
- [6] BPRW S.A.: Studium systemu komunikacyjnego dla miasta Łodzi.
- [7] Program inwestycyjny rozwoju trakcji szynowej na lata 2008 - 2013. Analiza popytu. DGA 2008.
- [8] Studium wykonalności Projektu Łódzki Tramwaj Regionalny - odcinek zgierski. Zgierz 2005. Źródło: <http://www.friedberg.pl>.
- [9] ec.europa.eu/eurostat
- [10] Krawiec S., Karoń G., Celiński I., Sobota A., Warunki ruchu w sieci drogowej konurbacji górnośląskiej w latach 2007-2008. Zesz. Nauk. Politechniki Śl. nr 1825, seria: Transport, 2010, z. 66, s. 43-56
- [11] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [12] Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transport., Wyd. Szumacher, Kielce 1998.
- [13] Chodur J.: Funkcjonowanie skrzyżowań drogowych w warunkach zmienności ruchu, Monografia habilitacyjna: Seria Inżynieria Lądowa, Zeszyty Naukowe - Politechnika Krakowska. Kraków 2007.
- [14] Szymczak M.: Logistyka miejska. Kompendium wiedzy o logistyce. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [15] Suhecki B.: Ekonometria przestrzenna. Wydawnictwo C.H.Beck, Warszawa 2010.
- [16] Tobler W. R.: A computer movie simulating Urban growth in the Detroit region. Economic Geography 46:234-40.1970.
- [17] Angel S., Hyman. G.: Urban fields: A geometry of movement for regional science. London: Pion.1976.
- [18] Anselin L. : Local indicators of spatial association–LISA. Geographical Analysis.1995
- [19] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci, WNT, Warszawa 1978.
- [20] Hasbrouck J., Seppi J.S.: Common Factors in Prices, Order Flows and Liquidity, Stern School of Business, New York 2000.

METHOD TO ASSESS THE IMPACT OF THE JUNCTIONS IN ROAD SYSTEMS

Abstract:

This paper presents a method of assessing the impact of intersections in road systems. Presented method allows to determine the impact of measurement and their values based on the results of microsimulations of road traffic. For this purpose, the compounds (relations) are defined by road traffic in the system. These compounds are determined from the traffic carried microsimulations using popular models: car following (CFM) and lane change (LCM). Develop measures of the impact of road traffic in the system dispenses with the calculated based on the traffic matrix compounds developed using methods of spatial analysis. The union matrices are analysed to adapt the organization and structure of traffic to the existing needs in this area. The method can be used in future for traffic control with an accuracy of a single cycle of traffic lights.

Key words: spatial analysis, traffic flow microsimulations, traffic flow models.