



Ireneusz CELIŃSKI, Grzegorz SIERPIŃSKI

### INTELIĞENTNE SKRZYŻOWANIE W LOGISTYCE MIEJSKIEJ

#### *Streszczenie*

*Artykuł prezentuje idee działania „inteligentnego” skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, jako elementu wspomagającego efektywne zarządzanie ruchem w mieście. W odróżnieniu od systemów sterowania, które pracują na zasadzie adaptacji do wybranych parametrów opisujących chwilowe warunki ruchu, prezentowana koncepcja pozwala dostosować działanie tych systemów do wymagań współczesnego ruchu w gęstych sieciach transportowych. Proces taki realizowany jest poprzez adaptację do innych, nowych charakterystyk strumieni. Obecnie, w gęstych sieciach drogowych występują sytuacje gdzie „proste” mierzenie podstawowych charakterystyk ruchu nie jest procesem wystarczającym aby zapewnić płynność ruchu mimo zasadnych działań podejmowanych w tym kierunku. W artykule proponowane jest takie rozwiązanie, w którym system sterowania skrzyżowaniem adaptuje się nie tylko do warunków ruchu, ale również do charakterystyk opisujących zachowania osób kierujących pojazdami. W prezentowanym podejściu, w zarysie, wykorzystano zagadnienia sztucznych sieci neuronowych i logiki rozmytej. W prezentowanej koncepcji zakłada się określenie sposobu pomiaru dodatkowych charakterystyk w stosunku do obecnie obserwowanych charakterystyk ruchu drogowego.*

#### WSTĘP

Transport odgrywa bardzo ważną rolę w każdej dziedzinie życia- z roku na rok coraz bardziej mobilność jednostki zaczyna decydować o jakości jej życia. Silna integracja systemu transportowego ze strukturą miast powoduje dużą zależność między rozwojem miasta a obsługującym go systemem transportowym. Zależność jest wzajemna. Należy pamiętać, że działania podejmowane w ramach logistyki miejskiej powinny ułatwić właściwe zarządzanie potokami ruchu. Zmieniające się warunki społeczne i gospodarcze determinują kierunki rozwoju miast, a w nich systemu transportowego. Z kolei stały wzrost liczby pojazdów na polskich drogach staje się przyczyną znacznych utrudnień w ruchu, tzw. kongestii. Kongestia oznacza skupienie, nagromadzenie, zatłoczenie i może występować przy użytkowaniu i konsumpcji wszystkich dóbr [38]. W przypadku sieci drogowej terminem silnej kongestii zwykło określać się sytuacje występowania dużej zależności między zachowaniem pojazdów współdzielących elementy infrastruktury. Zjawisko jest szczególnie widoczne w godzinach szczytu, przy dużej gęstości ruchu. Wówczas można obserwować znaczny spadek prędkości przemieszczania (w skrajnych przypadkach pojazd musi się zatrzymać oczekując w kolejce). Utrudnienia w postaci silnej kongestii są przyczyną znacznych strat czasu i skutecznie utrudniają realizację przemieszczeń. Transport drogowy posiada największy udział w wewnątrzmiastowym transporcie. Jest to odpowiednio 85% dla transportu pasażerskiego, a 44% dla transportu towarowego [11]. Dlatego zjawisko kongestii

jest szczególnie uciążliwe dla transportu drogowego. W literaturze można spotkać skrajne przykłady kongestii gdy np. przeciętny kierowca w Paryżu, spędzając godzinę w pojeździe, tylko przez 17 minut pozostaje w ruchu, a pozostałe 43 minuty oczekuje w kolejce pojazdów na możliwość dalszej podróży [30]. Kongestia to nie tylko straty czasu. Niesie ona za sobą także inne koszty transportu (opracowano na podstawie m. in. [4], [30]):

- wzrost kosztów utrzymania infrastruktury;
- straty związane z warunkami wykonywania podróży np. spadek wartości towarów na skutek długiego przewozu i uszkodzeń;
- koszty związane z niemożnością zrealizowania przewozu;
- wzrost kosztów środowiskowych – dłuższy czas pracy pojazdów oraz częste starty i zatrzymania w ciągu pojazdów powodują dodatkowe zanieczyszczenie powietrza oraz wzrost hałasu;
- wzrost zużycia paliwa.

Minimalizację negatywnych efektów funkcjonowania transportu powinno przynieść zastosowanie wytycznych w kierunku realizacji rozwoju równoważącego gałęziowo użycie środków transportu. Jednakże w obliczu współcześnie występujących zmian w rozkładach potoków ruchu na sieci drogowej wskazywany jest także rozwój inteligentnych systemów transportu (na przykład technologie inteligentnych systemów zarządzania transportem wśród kierunków rozwoju technologicznego województwa śląskiego do roku 2020 [34]), których posiadanie staje się warunkiem koniecznym do właściwego kształtowania logistyki miejskiej, w tym wypadku rozwoju sieci transportowej. W artykule zaproponowano rozwiązanie w postaci „inteligentnych skrzyżowań”. Autorzy zdefiniowali pojęcie w osobnym rozdziale.

## **1. ZDEFINIOWANIE POJĘCIA „INTELIAGENTNE SKRZYŻOWANIE”**

Sztuczna inteligencja jest, w ostatnim czasie, przedmiotem pewnej mody naukowej oraz licznych i niejednokrotnie dość ostrych sporów nie tylko w środowiskach akademickich. W dotychczasowej praktyce żadna ze zbudowanych przez człowieka maszyn nie wyszła poza ramy programu zdefiniowanego przez swojego twórcę (np. test A. Turinga, test chińskiego pokoju). W tym kontekście należy odnieść się do systemów sterowania stosowanych powszechnie w sieciach drogowych. Czy można istniejące obecnie systemy nazwać inteligentnymi? Z całą pewnością nie. Takie twierdzenie jest nieuprawnione w żadnym przypadku. Stwierdzenie o braku inteligencji systemów sterowania ruchem drogowym jest zasadne mimo rozwijania coraz to bardziej zaawansowanych systemów w oparciu o algorytmy neuronowe czy genetyczne. Wynika to z prostego faktu, oparcia metodyki funkcjonowania takich rozwiązań technologicznych o podstawowe parametry strumienia ruchu. Stosując analogię do innych dziedzin wiedzy to tak jakby lekarz, psycholog, fizjolog stawiali diagnozę na podstawie obserwacji parametrów fizycznych pacjenta. W międzyczasie jednak znacząco rozwijają się wszelkie systemy rozpoznawania wzorców i obrazowania. Pora zatem skoczyć ze stawianiem diagnozy w ruchu drogowym w oparciu o formę- należy uczynić krok w kierunku zbadania natury treści. Treścią zaś jest nie tylko odmienianie we wszelkich aspektach wykresów  $qkv$  ale również zajrzenie „głębiej” w strumień ruchu. Nietrudno jednak zauważyć, że strumień ruchu drogowego to pewna forma, żywa co do swojej struktury i natury funkcjonowania. Dobrze ujął to w swojej pracy Tracz, mówiąc że w ruchu drogowym zestawianie sztywnych wzorców, kryteriów oceny i doboru nie jest uzasadnione merytoryczne na podstawie obserwowanych charakterystyk i oddziaływań w ruchu drogowym. W oryginale: „nie jest praktyczne określania ścisłego kryterium wyboru skrzyżowania...” [32]. Jest to zwężenie wyrażenie stochastycznego charakteru ruchu drogowego w sieciach. Zwłaszcza jest to niezmiernie istotne w przypadku sieci gęstych. W tym kontekście postulowany system inteligencji dla skrzyżowania ma działać nie

w oparciu o zbieranie danych dotyczących wyłącznie struktury i formy (pewnej uzgodnionej podstawy w IRD), ale również powinien w oparciu o inne informacje (dodatkowe) rozpoznać właściwą treść. Treścią tą z pewnością nie są tylko i wyłącznie podstawowe parametry strumienia ruchu.

Inteligencja w kontekście systemów sterowania jest interesującą alternatywą dla dotychczas stosowanych systemów inżynierskich, dla których tworzone są reguły działania na podstawie wskazań ekspertów i danych empirycznych.

W przedmiocie zainteresowania niniejszej publikacji dotychczas jednymi z najbardziej zaawansowanych systemów sterowania ruchem drogowym były rozwiązania adaptacyjne [7]. Systemy takie oparte są na modelach adaptujących swoje wewnętrzne parametry sterowania w sposób uwzględniający charakterystyki dynamiczne danych dotyczących parametrów ruchu drogowego. Systemy adaptacyjne z kolei mogą być rozszerzane o podsystemy ML umożliwiające mechanizację akwizycji wiedzy na temat charakterystyk ruchu drogowego. Obecnie część systemów zmierza w kierunku poszukiwania nowych rozwiązań np. prognostycznych, gdzie adoptowane zmiany pozwalają na lepszą optymalizację w zadaniach sterowania ruchem drogowym (np. [9], [10], [12], [13], [14], [15], [16]).

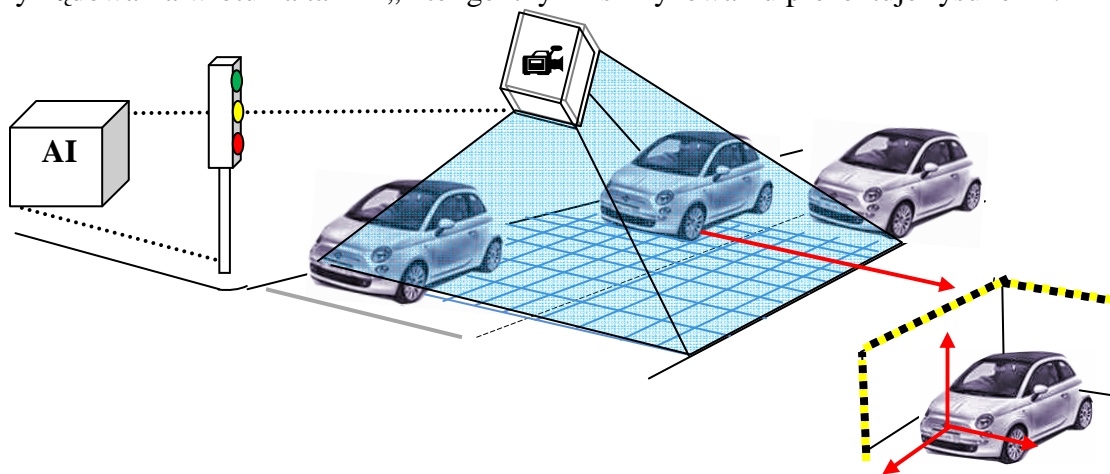
Wyróżnia się AI „silną” w przypadku, której proces myślowy zbliża się do jakości myślenia ludzkiego (maszyna wychodzi poza utarte wzorce i schematy) oraz „słabą”, gdzie rozwiązywane są zagadnienia dotyczące wyłącznie problematyki w wąskiej klasie, które można „sztywno” oprogramować. Z założenia postulowane zbudowanie skrzyżowania „inteligentnego” powinno zmierzać w kierunku przekraczania utartych wzorców w zakresie rozpoznawania parametrów ruchu drogowego. Jest to prawdopodobnie głównie kwestią zastosowania zasadnych technologii, głównie telekomunikacyjnych. Skoro nawet najbardziej rozległe systemy adaptacyjne w systemach sterowania ruchem drogowym nie radzą sobie z istniejącym popytem na sieć drogową, co jest alternatywą dla wprowadzenia inteligentnych systemów sterowania ruchem? Działania administracyjne jak pokazuje praktyka napotykają na opór społeczny- ludzie muszą sami być przekonani, że określone sprawy są zgodne z ich potrzebami.

Może należy spytać przede wszystkim czy jest możliwe stworzenie inteligentnej logiki sterowania sygnalizacją świetlną na skrzyżowaniach? Być może nie ma nawet takiej potrzeby, by skrzyżowanie przejawiało inteligencję w sensie dosłownym. Tym niemniej można i warto wyposażyć istniejące systemy sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną o nowe „inteligentne” rozwiązania w celu lepszego rozpoznawania procesów zachodzących w strumieniach ruchu. W dalszej części artykułu zaprezentowano koncepcje kilku z możliwych do ekstrapolacji rozwiązań w tym zakresie.

## **2. NIEZBĘDNE OPRZYRZĄDOWANIE (INSTRUMENTARIUM)**

Większość systemów adaptacyjnych wykorzystuje rozmaite systemy detekcji w celu dostosowania parametrów pracy do aktualnych warunków ruchu. Są to rozwiązania oparte na pętlach indukcyjnych i systemach wizyjnych realizujących rozpoznawanie i przetwarzanie obrazów. Część systemów wykorzystuje w tym celu rozwiązania niszowe takie, jak fotokomórki, radary, podczerwień i systemy mikrofalowe (te ostatnie stają się coraz bardziej popularne w ostatnich latach) (np. [23], [24], [32], [33]). Systemy detekcji mają różnorodne parametry i charakterystyki pracy. W przedmiotowym zagadnieniu interesującym systemem detekcji jest wyłącznie system oparty na obrazowaniu ruchu z wykorzystaniem urządzeń audio-video w połączeniu z systemami typu GSM, GPS, OBU i sieciami standardów: IEEE XXX.XX . Tylko takie rozwiązania umożliwią przeniknięcie formy i struktury strumienia ruchu drogowego i zagłębienie się w jego „treść”. Dotychczasowe formy organizacji ruchu wyczerpały się- chociażby z tego powodu że nawet najlepsze systemy ATCS pracują na poziomie  $X=0,9$ - mając przy tym problemy z realizacją tego trybu pracy. Proponowane

rozwiązanie skrzyżowania „inteligentnego” dotyczy koncepcji, w której system sterowania sygnalizacją na skrzyżowaniu adaptuje się nie tylko do warunków ruchu, ale również do zachowania kierujących pojazdami. Nie należy zapominać, że strumień ruchu to nie tylko pojazdy ale również żywi ludzie. Podmiotem działania w organizacji i sterowania ruchem to oni powinni pełnić zasadniczą rolę decyzyjną [5]. W takim podejściu nie wystarczą parametry ruchu drogowego zbierane na podstawie wskazań pętli indukcyjnych, fotokomórek czy radarów. Proponowane rozwiązanie z uwagi na zastosowanie bardziej zaawansowanych urządzeń z zakresu logiki sterowania, nie będzie się opierało wyłącznie na bazie charakterystyk ilościowych. Podstawą pracy tego systemu będą charakterystyki jakościowe, w tym zbierane na podstawie obserwacji biometrycznych. W tym zakresie zwraca uwagę bogate instrumentarium jakie może służyć realizacji takiego profilu badania ruchu. Zbieranie danych tego typu jest możliwe praktycznie wyłącznie poprzez badanie ruchu w paśmie wizyjnym i w zakresie niskich i wysokich częstotliwości radiowych. Schemat oprzyrządowania wlotu na takim „inteligentnym” skrzyżowaniu prezentuje rysunek 1.



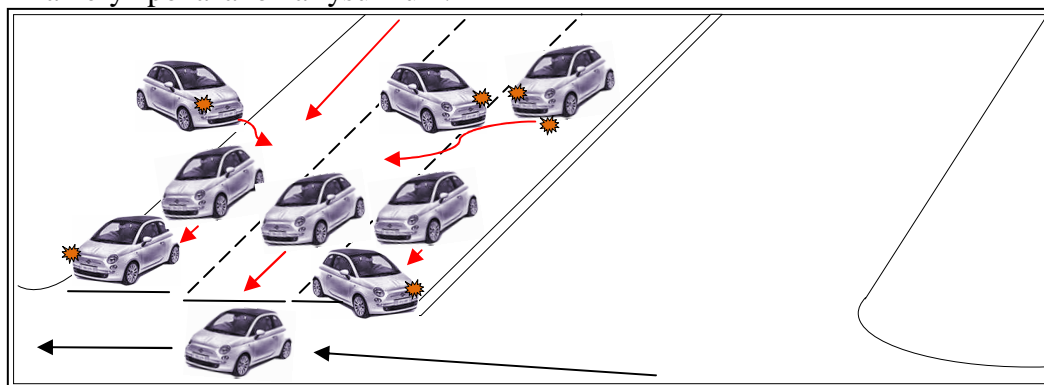
**Rys. 1.** Schemat oprzyrządowania wlotu „inteligentnego” skrzyżowania

**Źródło:** Opracowanie własne.

Skrzyżowanie „inteligentne” powinno posiadać możliwość rozpoznawania ruchu pojazdów na wlocie z dokładnością do pomiaru punktów charakterystycznych pojazdów w wymiarach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . W takim układzie należy takie skrzyżowanie wyposażyć w zespół 1-2 kamery na pojedynczy pas ruchu (lub nawet więcej). Sam problem rozpoznawania i przetwarzania obrazu w ruchu drogowym posiada bogatą literaturę – nie jest przedmiotem zainteresowania tego artykułu (np. [3], [6], [28]). Zakłada się, że pozycja każdego pojazdu na wlocie takiego skrzyżowania może być kontrolowana z dokładnością do  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  dla punktu charakterystycznego. Takim punktem może być np. lusterko boczne po stronie kierowcy, twarz kierowcy, rejestracja współpasażera, wyposażenie dodatkowe pojazdu, temperatura silnika (w paśmie podczerwieni) itp. Zakłada się ponadto, że system wizyjny takiego skrzyżowania może rejestrować zmiany punktów charakterystycznych pojazdów z dokładnością dochodzącą do kilku centymetrów (w zależności od rozdzielczości systemu optycznego i możliwości przetwarzania danych). Rozszerzając zdolność systemu do takiej akwizycji danych na pas ruchu (strumień pojazdów) i wlot, każdy pojazd na wlocie może być rejestrowany z dużą dokładnością – w praktyce może być rejestrowane zachowanie kierujących tymi pojazdami. Następuje przejście w takiej koncepcji od opisu makroskopowego i mikroskopowego przestrzeni zdarzeń do opisu mikroskopowego w połączeniu z nanoskopowym.

### 3. IDEA: ROZSZERZENIE ZDOLNOŚCI ADAPTACYJNYCH

Przedmiotem rozważań jest budowa i określenie zasad działania „inteligentnego” skrzyżowania z jednoczesnym dostosowaniem pracy sterownika sygnalizacji świetlnej do aktualnych zachowań kierujących pojazdami. Jeżeli założyć ponadto, że można kwantyfikować położenia każdego pojazdu z dokładnością do drobnych i chwilowych jego zmian umożliwiających wychwycenie każdego drobnego manewru w strumieniu to jest to możliwe do realizacji w praktyce. Stosowane dotychczas miary strumienia w systemach adaptacyjnych sterowania ruchem bazują na kwantyfikacji ilościowej – co najwyżej miary te zostają zamienione na jakościowe. W takich systemach badana jest z reguły liczba pojazdów na wlocie, w kolejce lub w kolejce pozostającej i pojawianie się pojazdów w jednym lub dwóch przekrojach na wlocie skrzyżowania [7]. Niezależnie od typu badanego parametru, czy jest to natężenie, prędkość lub długość kolejki jest to kwantyfikacja ilościowa strumienia ruchu. W proponowanej metodzie dla skrzyżowania „inteligentnego” proponuje się zastąpienie charakterystyk ilościowych strumienia ruchu (poziom makroskopowy analizy ruchu), charakterystykami ilościowymi i jakościowymi w odniesieniu do pojedynczych pojazdów. Oznacza to przejście do stosowania procedur znanych z mikrosymulacji ruchu drogowego, z jednoczesnym wprowadzeniem skali nanoskopowej. Strumień pojazdów nie jest zbiorem jednorodnych obiektów. Ponadto zachowania, w tym trajektorie pojazdów na wlotach mają charakter stochastyczny. Autorzy proponują zatem skupić uwagę, w ramach analiz ruchu drogowego na zachowaniu osób kierujących pojazdami na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Umożliwi to w praktyce realizację logiki „inteligentnego” skrzyżowania. Przykładowy obraz niejednorodnego strumienia ruchu pojazdów na wlocie „okiem kamery” pokazano na rysunku 2.



**Rys. 2.** Niejednorodny strumień pojazdów na wlocie „inteligentnego” skrzyżowania

**Źródło:** Opracowanie własne.

Jak widać na rysunku 2, kolejka pojazdów „żyje własnym życiem”: pojazdy zmieniają pas ruchu, podjeżdżają (na odcinkach o różnej długości), zachowują różny odstęp (nie zawsze bezpieczny dla pojazdu ruszającego z przodu). W obrębie ulicy znajdują się pojazdy często nie rejestrowane przez klasyczne systemy sterowania – w przypadku kongestii pojazdy zajmują częstokroć nietypowe pozycje w strumieniu ruchu (poza systemami detekcji). Strumień dojeżdżający zachowuje się podobnie choć wariancja parametrów takiego strumienia jest inna. Mniejsze odchylenia obserwowane są w poprzek pasa ruchu w stosunku do dyspersji potoku ruchu wzdłuż pasa. W kolejce oczekującej, w której akumuluje się kilka źródłowych strumieni) często to ruchy poprzeczne w strumieniu są istotne (niecierpliwi kierowcy zmieniający pasy, w tym z pogwałceniem przepisów prawa o ruchu drogowym).

### 3.1. Systemy adaptacyjne

Adaptacyjne sterowanie ruchem w odróżnieniu od sygnalizacji stałoczasowych wykazuje możliwość dostosowywania do zmieniających się warunków na skrzyżowaniu. Jak pisano wcześniej dane pozyskiwane są z różnego rodzaju detektorów. Sterowanie adaptacyjne umożliwia uzyskanie poprawy płynności ruchu, a stosowane algorytmy (podobnie jak w metodach adaptacyjnych) pozwalają krótkoterminowo prognozować sytuację na sieci drogowej. Przykładowo system MOTION, w założeniu swojego działania, zmniejsza zużycie paliwa i ilość emisji szkodliwych substancji do otoczenia poprzez [19]:

- optymalizację sterowania obszarowego poprzez kontrolowanie wszystkich sterowników;
- obliczania koordynacji dla dozwolonej prędkości w danym obszarze;
- optymalizację strumieni ruchu w zależności od wybranej strategii („minimalizacja czasów oczekiwania → optymalizacja czasów przejazdu” lub „minimalizacja liczby zatrzymań → zmniejszenie zużycia paliwa”).

W literaturze można spotkać wiele zaawansowanych algorytmów optymalizacji ruchu z wykorzystaniem adaptacyjnych systemów sterowania (np. [29], czy bibliografia zebrana w [27]). Autorzy artykułu proponują rozważenie innego podejścia. „Wartością dodaną” do tego rodzaju sterowania powinna stać się szersza detekcja ze wspomaganiami procesu decyzyjnego. Dynamiczne zmiany wielu wartości wejściowych w takim systemie nie są uwzględniane w pełni (właśnie z uwagi na ich znaczącą liczbę).

### 3.2. Proponowane rozwiązanie: 10≠10

Na rysunku 2 pokazano, że strumień pojazdów na skrzyżowaniu nie jest jednorodny. Jest tak zarówno w przypadku kolejki pojazdów oczekujących, jak również w przypadku pojazdów dojeżdżających (w tym przypadku jest mniejsza wariancja procesów pokazanych na rysunku 2). Jednorodność nie jest obserwowana ani w przekroju drogi, ani na jej długości, ani w poprzek drogi. Można tutaj postawić pytania – czy zatem sterowanie adaptacyjne bazujące na podstawie charakterystyk ilościowych jest prawidłowe? Czy dobrze odwzorowuje strumień ruchu pojazdów na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną? Odpowiedź jest stosunkowo prosta: dobrze odwzorowuje ruch na wlotach w zakresie obserwowanych – podstawowych charakterystyk ilościowych. Niestety nie odwzorowuje rzeczywistego procesu ruchu – jego stochastycznego charakteru – jest tak w przypadku manewrów wykonywanych przez pojazdy oczekujące w kolejce oraz do niej dojeżdżające. Zdaniem autorów skrzyżowanie „inteligentne” jest w stanie – uwzględniając zachowania kierowców – lepiej sterować sygnalizacją świetlną w sytuacjach „trudnych ruchowo”. Oznacza to w praktyce, że programy oparte o metody adaptacyjne powinny być w drobny sposób zmodyfikowane (rozbudowane). Modyfikacja dotyczy uwzględnienia procesów, które mogą być obserwowalne przez system rejestracji „inteligentnego” skrzyżowania.

W kolejce pojazdów oczekujących na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną można obserwować różne procesy – na przykład: pojazdy skracają odstęp między poprzednikiem, podjeżdżają do linii zatrzymania (liderzy w kolejce), zmieniają pas ruchu (często w nieprawidłowy sposób), zmieniają sygnalizację manewru (w tym błędna sygnalizacja), stają na nieprawidłowym pasie ruchu, dojeżdżają do kolejki, blokowane są przez pieszych i tramwaje, blokowane są przez uprzywilejowane sygnały dla transportu zbiorowego, piesi reagują nerwowo na źle dobrane parametry sygnalizacji. Wszystkie te procesy praktycznie nie są uwzględniane w żaden sposób w dotychczasowych rozwiązaniach. Niestety przypadki te zaczynają stanowić istotny wolumen w obrazie ruchu drogowego w gęstych sieciach transportowych. W przypadku wyposażenia skrzyżowania w

system inteligentny można prawdopodobnie dostosować pracę sygnalizacji do wymienionych wyżej zachowań kierujących pojazdami w kolejce i pieszych oczekujących na przekroczenie jezdni.

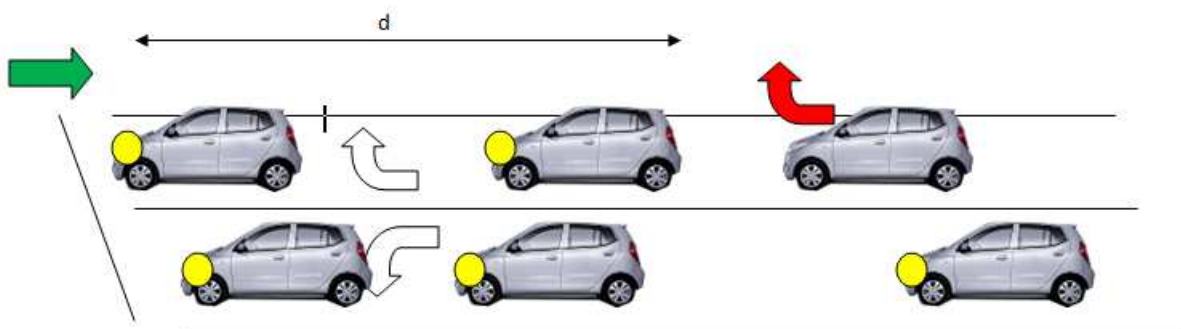
Korzyści, jakie wynikają bezpośrednio z proponowanego wprowadzenia „inteligentnych” skrzyżowań przedstawiono w tabelicy 1. W tabelicy w pierwszej kolumnie zamieszczono obserwowany rodzaj zachowania kierujących pojazdami, w kolumnie drugiej możliwości oddziaływania sterownika sygnalizacji w kierunku dostosowania parametrów sygnalizacji do warunków ruchu.

**Tab. 1.** „Inteligentne” skrzyżowanie – możliwości adaptacji do warunków ruchu

Lp.	reakcje sterownika podejmowane w odpowiedzi na warunki ruchu	
	rodzaj zachowania/manewru	reakcja sterownika
1.	agresywne skracanie odstępu w kolejce	wydłużenie sygnału G dla strumienia
2.	zmiany pasa w kolejce	zmiany G dla podfazy lub ZG dla sygnału dopuszczającego jazdę w kierunku wskazanym strzałką
3.	długie odstępy w kolejce	skracanie sygnału G dla strumienia
4.	blokowanie prawoskrętów	Wydłużenie podfazy lub sygnału dopuszczającego jazdę w kierunku wskazanym strzałką
5.	Długie czasy opóźnienia startu	Sygnalizacja VMS dla kierujących w strumieniu, ew. montaż odliczników
6.	Podjeżdżanie do linii zatrzymań, przekraczanie jej	Wydłużanie lub wprowadzanie podfaz z wyprzedzeniem
7.	Wiele inne zachowań	Zgodnie z logiką rozwiązywania problemu

**Źródło:** Opracowanie własne.

W tabelicy 1 przedstawiono jedynie przykładowe działania podejmowane przez sterownik „inteligentnego” skrzyżowania w odpowiedzi na obserwacje zachowań kierujących pojazdami na wlotach skrzyżowania. Są to wszystko lub w znacznej większości procedury, których nie można wprowadzić do programu sygnalizacji „a priori”. Procedur tych nie można również rzetelnie odczytać ze stosowanych obecnie systemów detekcji. Powinny być one „z krótkim czasem reakcji” analizowane przez podsystem wizyjny skrzyżowania „a posteriori” na podstawie obserwacji pojazdów na wlocie. Jeden przykład należy wyjaśnić bardziej szczegółowo. System wizyjny na takim skrzyżowaniu może zaobserwować zjawisko blokowania pojazdów skręcających w prawo.



**Rys. 3.** Jaki proces może zarejestrować „inteligentne” skrzyżowanie

**Źródło:** Opracowanie własne.

Założmy, że na wlocie są dwa pasy ruchu o organizacji: L i P (rys. 3) lub L, LP. Pomimo wydzielonego pasa ruchu pojazdy realizujące manewry lewoskrętu zajmują pas prawy blokując możliwość zjeżdżania pojazdom w relacjach skrętu w prawo w czasie nadawania sygnału dopuszczającego jazdę w kierunku wskazanym strzałką (nadal potocznie nazywanego

„zieloną strzałką” w prawo). Może to się odbyć poprzez celowe przekroczenie przepisów lub na podstawie wykorzystania wspólnego pasa w zgodzie z przepisami. Jest to nader częsty przypadek obserwowany na polskich drogach – w rezultacie tracone jest bezpowrotnie kilka cennych sekund w długości cyklu (co w skali godziny daje już znaczące straty czasu, a dla manewru skrętu obsługiwanego w cyklu oznacza bezpowrotną stratę jednej fazy w 100%). Sytuacje takie powodują obniżenie sprawności skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Skrzyżowanie „inteligentne” ma właśnie pomóc w rozwiązywaniu takich i jemu podobnych problemów (wybrane przypadki wymieniono w tablicy 1).

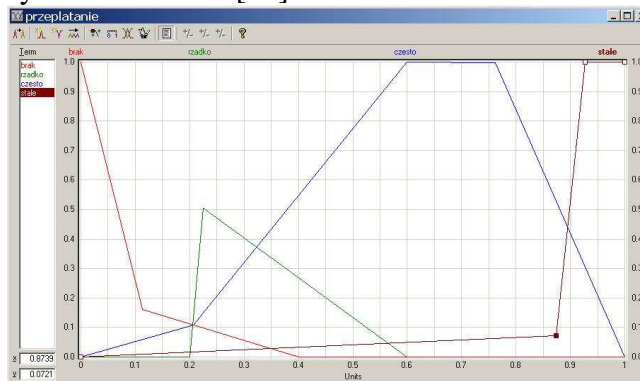
Najciekawszym zastosowaniem proponowanego skrzyżowania wyposażonego w „inteligencję opartą na systemie wizyjnym” jest rozstrzygnięcie konfliktów. Można kolokwialnie stwierdzić, że w przypadku takiego sterowania  $10 \neq 10$ . W praktyce na skrzyżowaniu często pojawiają się sytuacje, w których w kolizyjnych grupach sygnalizacyjnych pojawiają się zbliżone liczby pojazdów (stąd przytoczone  $10 \neq 10$  ( $10:10$  pojazdów w kolizyjnych grupach)). Nie dotyczy to tylko wartości bezwzględnych długości kolejki oczekującej, ale również zbliżonych co do rzędu wartości (nie musi być to dokładnie tyle samo pojazdów w każdej z kolizyjnych grup sygnałowych). Proponowane skrzyżowanie w takich przypadkach, gdy kolizyjne grupy mają zbliżoną liczbę pojazdów, pozwala rozstrzygać potencjalne konflikty. W takim przypadku jest bowiem możliwe określenie dodatkowych parametrów charakteryzujących obie kolizyjne grupy pojazdów. Dla przykładu w grupie, w której obserwowane będą bardziej „agresywne” charakterystyki (skracanie dystansów między pojazdami, przekraczanie linii zatrzymań) podany zostanie sygnał zezwalający na ruch w pierwszej kolejności. Ewentualnie podawany dla takiej grupy sygnał zielony będzie wydłużany i vice versa. Oczywiście logika ta w założeniu będzie oddziaływała również represyjnie na kierowców celowo wprowadzających utrudnienia w ruchu... Pojawiać się mogą liczne dywagacje czy takie działanie ma sens? Autorzy toczyli w tym zakresie dyskusje. Problem sprowadza się do wyboru takich parametrów strumienia ruchu, które nie mogą być wywoływane w sposób sztuczny. W tej chwili osoba znająca zasady działania systemów sterowania ruchem może w pewnym zakresie w sposób sztuczny wpływać na pewne procedury w systemach sterowania ruchem drogowym.

### 3.3. Podsystemy sterowania „inteligentnym” skrzyżowaniem

Wyżej w tekście zaznaczono, że proponowane rozwiązanie „inteligentnego” skrzyżowania oparte jest na analizie wizyjnej zachowań osób kierujących pojazdami na jego wlotach. Czym jest zachowanie? Jakie parametry są istotne w przedmiocie obserwacji dla strumienia ruchu drogowego? Jak je kwantyfikować? Zachowaniu osób kierujących pojazdami na wlotach skrzyżowania można co prawda nadawać jakiegokolwiek parametry i na podstawie sztywnych reguł decyzyjnych zmieniać parametry sterownika sygnalizacji świetlnej. Można też w tym przypadku skorzystać z właściwości logiki rozmytej (ang. fuzzy logic) [2], [25], [36], [37]. Logika tego typu jest naturalnym narzędziem opisu zmiennych decyzyjnych, których nie można wyrazić dokładnie. Taką zmienną będą opisy wszystkich zachowań osób kierujących pojazdami na wlotach „inteligentnego” skrzyżowania. Dla przykładu pojazdu, który stanie między pasami ruchu w celu zmiany pasa ruchu, nie można skwantyfikować do żadnej grupy lub jest to dyskusyjne. W związku z tym, w omawianej koncepcji proponuje się wprowadzenie zmiennych lingwistycznych dla każdego typu zachowania obserwowanego na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Konsekwentnie można zdefiniować zmienną lingwistyczną określającą częstość zmiany pasa ruchu na wlocie: „przeplatanie”. Dla zmiennej „przeplatanie” można wprowadzić cztery terminy: *brak*, *rzadko*, *często*, *stale* (opisy zmiennych zachowań). Terminy proponowanej zmiennej lingwistycznej



przedstawiono na rysunku 3. W celu prezentacji zmiennych lingwistycznych wykorzystano program FuzzyTech firmy Inform GmbH [36]



**Rys. 3.** Terminy zmiennej lingwistycznej „przeplatanie”

**Źródło:** Opracowanie własne.

Każda z terminów, przedstawionych na rysunku 3, dla zmiennej lingwistycznej „przeplatanie”: *brak*, *rzadko*, *czesto*, *stale*, opisuje z pomocą swojej funkcji przynależności zachowanie kierującego w zależności od wartości zmiennej wejściowej. W rozpatrywanym przypadku wartością tą może być względna częstość zmian pasa ruchu przez pojazdy na danym wlocie (iloraz  $\text{pojazdy\_zmieniajace\_pas} / \text{wszystkie\_pojazdy\_na\_wlocie}$ ). Podobnie wprowadzić można zmienne lingwistyczne dla zachowań określających skracanie odstępów przez kierujących w strumieniu na wlocie np. „*skracanie*” z odpowiednimi terminami ją opisującymi: *brak*, *w normie*, *agresywne*. W rezultacie można zbudować system wnioskowania rozmytego oparty np. na zmiennych lingwistycznych: *przeplatanie*, *skracanie*, *przekraczanie* (linii zatrzymań), *blad* (w przypadku błędnego sygnalizowania manewrów). Wymienione zmienne lingwistyczne mogą posłużyć do wyciągania wniosków na temat parametrów stosowania podfazy dla manewru skrętu, wydłużania długości sygnału zielonego, przydzielania fazy dla pasa ruchu na którym notowane są wartości dla wymienionych zmiennych lingwistycznych. Zmienną wyjściową może być np. „długość czasu zielonego G”. Uproszczony schemat ideowy wnioskowania rozmytego tego typu przedstawiono na rysunku 4.



**Rys. 4.** System wnioskowania rozmytego

**Źródło:** Opracowanie własne.

Na rysunku 4 przedstawiono pewien banalny blok wnioskowania rozmytego (fuzzy logic) dla zaproponowanych wcześniej zmiennych lingwistycznych. Nieprecyzyjne określenia zachowania osób kierujących (4 zmienne lingwistyczne) są rozmywane. Po określeniu dla każdej zmiennej terminy i odpowiadającej jej funkcji przynależności system regułowy wnioskowania rozmytego określa funkcje przynależności zmiennej wyjściowej (kombinacje

wejść). W kolejnym kroku wartość uzyskana na podstawie zmiennych lingwistycznych opisujących zachowania kierowców jest wyostrzana (np. za pomocą metody CoM). Blok tego typu na podstawie nieostrej oceny zachowań kierujących w 4 przekrojach analizy prawdopodobnie jest w stanie określić modyfikacje sygnału zielonego dla sterownika adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej. Jest to pewien przykład poglądowy, w rzeczywistości systemy tego typu mogą być bardziej złożone

### **3.4. „Inteligentne” skrzyżowanie w systemach sterowania obszarowego ruchem drogowym**

Proponowany inteligentny algorytm dostosowywania programu pracy sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach na podstawie analizy zachowań osób kierujących pojazdami może znaleźć również zastosowanie w systemach typu ATCS (ang. advanced traffic control systems). Wariacja zmian zachowań osób kierujących pojazdami na dużym obszarze sterowania ruchem drogowym może prowadzić do wielu ciekawych analiz. Mają tu swoje odniesienia elementy teorii chaosu [20], [21], [22]. Dla przykładu można przedstawić kwestie: jak przejazd kierującego w sposób agresywny pojazdem użytkownika sieci wpływa na propagację zaburzenia na jej rozległych krańcach. Również podział sygnałów zielonych pomiędzy grupy kolizyjne na kolejnych skrzyżowaniach w takim przypadku stwarza dużą możliwość wariantowania rozwiązań sterowania ruchem. Pojawi się również problem obserwowania i kwantyfikowania zachowań kierujących pojazdami na odcinkach między węzłowych. W grupie tej pojawi się więcej możliwych zmiennych lingwistycznych aniżeli omawiane powyżej. Problem ten przekracza ramy tego artykułu.

### **3.5. „Inteligentne” skrzyżowanie w sieci neuronowej**

W przypadku zastosowania tzw. sieci neuronowych możliwe będzie gromadzenie i selekcjonowanie danych oraz wyciąganie logicznych wniosków ze zgromadzonej teoretycznej i doświadczalnej wiedzy [8]. Zatem uprawnionym jest nazywanie modeli opartych na sieciach neuronowych modelami „sztucznej inteligencji” umożliwiającymi uczenie się na podstawie obserwacji otoczenia (konkretnego zjawiska) i na tej podstawie podejmowanie decyzji. Do omawianej w artykule koncepcji, z uwagi na występujące założenia, wskazane jest zastosowanie właśnie sieci neuronowych. Obserwacja zgłoszeń pojazdów, nietypowych zachowań, prędkości, odległości między pojazdami to zjawiska, które pozwolą klasyfikować przyszłe zdarzenia, poprzez analogie. Uczenie neuronów powinno być realizowane przez odpowiedni wstępny dobór wag neuronu. Trzy problemy wskazywane w literaturze [31], w przypadku stosowania sieci neuronowych to:

- dobór odpowiedniej wielkości zbioru uczącego;
- określenie wielkości współczynników uczenia;
- zdefiniowane czasu uczenia (a co za tym idzie określenie kryteriów pozwalających na ocenę procesu uczenia).

Należy dodać, że warstwowa budowa sieci neuronowej efektywnie pozyskuje dane wejściowe (w tym wypadku z obserwacji zgłoszeń na wlotach skrzyżowania), by następnie w sprawny sposób wskazać właściwy sygnał wyjściowy. Można przypuszczać, że wystarczające byłaby w omawianej koncepcji zastosowanie liniowych sieci neuronowych o liczbie neuronów równej liczbie rozróżnianych klas klasyfikacji. Założenie takie wymaga wstępnej weryfikacji w celu określenia wielkości modelu sieci.

## PODSUMOWANIE

Proponowane rozwiązanie jest z pewnością dyskusyjne tym niemniej stanowi alternatywę dla pracujących na granicy przepustowości systemów sterowania obszarowego. Warto zwrócić uwagę na fakt, że optymalizacja czasów zielonych jest możliwa w systemach adaptacyjnych, jednak brak w nich „tej” dodatkowej inteligencji. Tu jednak istnieją pewne granice, które być może rozwiążą skrzyżowania „inteligentne”. Może warto dać większy czas zielony w programie sygnalizacji na skrzyżowaniu dla strumienia ruchu, którego uczestnicy w lepszy sposób wykorzystają ten okres pracy sygnalizacji (może niekoniecznie proporcjonalnie do stopnia nasycenia)? Stosunkowo prosto takie podejście można zrealizować w praktyce mierząc parametry dyspersji strumieni ruchu na skrzyżowaniach poprzedzających punkt decyzyjny? Można wtedy dać więcej czasu mniej sprawnym? Lub vice versa w zależności od kryterium sterowania? Wymaga takie podejście przede wszystkim wyposażenia skrzyżowań tego typu w dobre systemy wizyjne. Poza obecnością systemów wizyjnych konieczne jest zdefiniowanie „inteligencji działania” (w postaci algorytmu), która na podstawie obserwacji zachowań kierowców na wlotach będzie ingerowała w parametry pracy sterownika sygnalizacji świetlnej. Inteligencji opartej na bazie logiki rozmytej i sztucznych sieci neuronowych lub innych algorytmów dziedzinowych adekwatnych do rozwiązywania przedstawianych problemów. Zdaniem autorów takie rozwiązanie może być rozszerzeniem logiki adaptacyjnej stosowanej dotychczas w sterowaniu ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Sprawność takiego rozwiązania oraz stosunek zysku do kosztów realizacji można zweryfikować jedynie w praktyce lub na bazie mikrosymulacji ruchu drogowego. Kompletny opis takiego systemu przekracza ramy niniejszego artykułu w związku z czym tutaj zasygnalizowano jedynie koncepcję działania takiego systemu. Problemem do rozwiązania pozostaje, zasygnalizowany w tekście, sposób kwantyfikowania manewrów kierujących pojazdami na wlotach skrzyżowań. Temat ten jest na tyle szeroki, że wymaga dalszych szczegółowych prac badawczo-rozwojowych.

## INTELLIGENT INTERSECTION IN CITY LOGISTICS

### *Abstract*

*The article deals conception of “intelligent” intersection usage as support to effective traffic management in city. Presented idea helps to adjust control systems to contemporary traffic in dense transportation network (in opposition to adaptive signal control). Currently, in dense transportation network, simple measure of basic traffic parameter are not sufficient to very complex situations on roads. Conception of adaptive control with travel behavior analyzing with fuzzy logic and neural network usage was proposed in this article.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Allsop R. E.: *Delay at a fixed time traffic signal – I: Theoretical analysis*. Transportation Science, 6, 3, 260-285, London 1972.
2. Altrock C.: *Fuzzy logic and neuroFuzzy applications in business and finance*. Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, cop. 1997
3. ARTR - *Odczyt tablic rejestracyjnych. Przykłady Inteligentnej Analizy Obrazu - rozpoznanie twarzy, analiza zachowań itp.* <http://www.ithome.pl/6/> (odsłona 6.10.2012).
4. Bąk M. (red.): *Koszty i opłaty w transporcie*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2009.

5. Celiński I, Sierpiński G.: *Koncepcja obliczania przepustowości z wykorzystaniem technologii GSM i GPS* (artykuł przesłany do redakcji Przeglądu Komunikacyjnego).
6. Edgar R.: *Evaluation of microwave traffic detector at the Chemawa Road/Interstate 5 Interchange*. Final Report Project 304-021. Oregon Department of Transportation Research Group, April 2002.
7. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. WKiŁ, Warszawa 2008.
8. Gutenbaum J.: *Modelowanie matematyczne systemów*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
9. Helbing D., J. Siegmeier S. Lammer.: *Selforganized network flows*. Networks and Heterogeneous Media, 2007.
10. Helbing D.: *Modelling supply networks and business cycles as unstable transport phenomena*. New Journal of Physics, 2003.
11. *Keep Europe moving – Sustainable mobility for our continent*. Mid-term review of the European Commission's 2001 Transport White Paper. COM(2006) 314 final, Brussels 2006.
12. Lammer S., Helbing D.: *Self-control of translights and vehicle flows in urban road networks*. Journal of Statistical Physics P, 2008.
13. Lammer S., Kori H., Peters K., Helbing D.: *Decentralised control of material or traffic flows in networks using phase-synchronisation*. Physica A, 2006.
14. Lammer S., Krimmling J., Hoppe A.: *Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Strassenetzwerken*. Strassenverkehrstechnik 11, 2009.
15. Lammer S., Donner R., Helbing D.: *Anticipative control of switched queueing systems*. The European Physical Journal B 63, 2007.
16. Lammer S.: *Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen In Straßennetzwerken*. Dresden University of Technology, 2006.
17. Leśko M., Guzik J.: *Sterowanie ruchem drogowym – sygnalizacja świetlna i detektory ruchu pojazdów*. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
18. Leśko M., Guzik J.: *Sterowanie ruchem drogowym. Sterowniki i systemy sterowania i nadzoru ruchu*. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
19. Liu H. X., Oh J.-S., and Recker, W.: *Adaptive signal control system with on-line performance measure*. California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-2002-5.
20. Lorenz E. N.: *Can chaos and intransitivity lead to interannual variability?* Tellus. Vol.42A 1990.
21. Lorenz E. N.: *Designing Chaotic Models*. Journal of the Atmospheric Sciences: Vol. 62, No. 5, pp. 1574–1587.
22. Lorenz E. N.: *Nondeterministic theories of climate change*. Quaternary Research. Vol.6 1976.
23. Mazur M.: *System detekcji i rozpoznawania znaków drogowych*. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, praca dyplomowa, Kraków 2009.
24. Peiris S.: *Bicycle Detection at Signalized Intersections*. City of Palo Alto, <http://www.mtc.ca.gov/> (odsłona 7.10.2012).
25. Piegat A. *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Akademicka oficyna wydawnicza EXIT, Warszawa 1999
26. Rutkowski L.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. PWN, Warszawa 2005.
27. SITRAFFIC Motion, [http://www.mobility.siemens.pl/main\\_imo/6699.htm](http://www.mobility.siemens.pl/main_imo/6699.htm) (odsłona 7.10.2012).
28. Steindel M.: *Technologies for automated pedestrian detection at signalized intersections*. University of Manitoba Transport Information Group, <http://www.cite7.org/> (odsłona 6.10.2012).

29. *Systemy inteligentnego monitoringu*. <http://www.inteligentnymonitoring.pl/> (odsłona 7.10.2012).
30. Szymczak M.: *Logistyka miejska*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań 2008.
31. Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
32. Tracz M., Allsop R. E.: *Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną*. WKŁ 1990
33. *Traffic Control Systems Handbook: Chapter 6. Detectors*. U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, <http://ops.fhwa.dot.gov/> (odsłona 7.10.2012).
34. *Uchwała Komitetu Sterującego Regionalnej Strategii Innowacji Województwa Śląskiego Nr 2/2011 z dnia 11 marca 2011 r.*, Załącznik 1 Zaktualizowana „Lista kierunków rozwoju technologicznego województwa śląskiego do roku 2020” identyfikująca priorytetowe obszary specjalizacji technologicznych (obszary technologiczne) oraz technologie.
35. Winter K.: *Adaptive Signal Control Gradually Emerging As a New Way to Decrease Costs Associated With Delays, Stops and Fuel Consumption*. Charlottesville, October 2007.
36. [www.fuzzytech.com](http://www.fuzzytech.com)
37. Zadeh L.: *Fuzzy Set*. Information and Control. vol. 8, 1965
38. Zamkowska S.: *Środki i metody przeciwdziałania kongestii w miastach* [w:] Woch J., Janecki R., Sierpiński G. (red.): *Współczesne systemy transportowe. Wybrane problemy teorii i praktyki*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Monografia nr 202. Gliwice 2009.

**Autorzy:**

**mgr inż. Ireneusz CELIŃSKI**

**dr inż. Grzegorz SIERPIŃSKI** – Wyższa Szkoła Biznesu w Dąbrowie Górniczej